

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Analýza chování optických vláken pomocí DSTS-b
Analysis of Optical Fibers Behaviour with the Help of DSTS-b**

2016

Bc. Petr Zbaník

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Petr Zabaník

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Analýza chování optických vláken pomocí DSTS-b
Analysis of Optical Fibers Behaviour with the Help of DSTS-b

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Práce bude kolektivně rozdělena do tří spolu souvisejících částí, přihlášení studenti jsou:

Bc. Stanislav Lovecký, Bc. Petr Zabaník a Bc. David Hájek.

DSTS systémy patří k nejperspektivnějším vláknově optickým systémům pro monitorování mechanických vlastností optických vláken. Pro tuto práci se řiďte následujícími body:

1. Popište princip činnosti DSTS systémů.
2. Změřte Brillouinové frekvence pro různé typy optických vláken v závislosti na teplotě.
3. Vyhodnoťte získané teplotní závislosti a stanovte empirické relace popisující tuto závislost.

Seznam doporučené odborné literatury:


[1] Udd, E., Spillmann, W.B.: Fiber Optic Sensors. J.Wiley and Sons, New Jersey [2] Podle pokynů vedoucího práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. dubna 2016


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Marcelu Fajkusovi za cenné rady při měření.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá analýzou chování optických vláken pomocí DSTS (distribuované snímání mechanického napětí a teploty) systému, který ke své činnosti využívá stimulovaného Brillouinova rozptylu. V prvních třech kapitolách práce, které jsou věnovány teoretické části, jsou stručně popsány rozptyly světla, optická vlákna a aplikace rozptylů světla u optických vláken. Čtvrtá kapitola je věnována praktické části, ve které bylo úkolem změřit Brillouinovské frekvence pro různá optická vlákna v závislosti na teplotě. Celkem bylo měřeno pět telekomunikačních vláken. Způsoby měření vláken byly tři. Prvním způsobem měření bylo vlákno neuchycené. Další dva způsoby měření byly, kdy vlákno bylo uchycené pomocí dvou různých fixačních materiálů (lepidel) k plechu. Naměřené výsledky jsou v práci zobrazeny ve formě tabulek s hodnotami a grafů. U všech vláken a jednotlivých způsobu měření byly také vypočteny teplotní koeficienty. V závěru práce jsou naměřené výsledky zhodnoceny.

Klíčová slova

DSTS; optické vlákno; stimulovaný Brillouinův rozptyl; vláknový optický senzor

Abstract

This diploma thesis deals with analyzing of optical fibers behaviour with the help of DSTS (Distributed Strain and Temperature Sensing) system, which uses stimulated Brillouin scattering for its operation. The theoretical part of this thesis is in three introductory chapters, where are briefly described light scattering, optical fibers and light scattering application in optical fibers. Fourth chapter is already practical part where the main objective was measure Brillouin frequency for different kinds of optical fibers in dependence on temperature. There were five kinds of telecommunication fibers measured with three different ways of measurement overall. In first way of measuring the optical fiber was not attached. In two other ways of measuring was the optical fiber attached with two different fixing materials (glues) to metal plate. The results of measuring are displayed in tables and figures. There were also calculated a temperature coefficients for all single fibers and ways of measurement. The results are evaluated in the end of this thesis.

Key words

DSTS; Optical Fiber; Stimulated Brillouin Scattering; Fiber Optic Sensor

Obsah

Seznam použitých zkratk	- 9 -
Úvod	- 10 -
1 Rozptyl světla	- 11 -
1.1 Popis rozptylu světla	- 12 -
1.2 Lineární rozptyly světla	- 12 -
1.2.1 Rayleighův rozptyl	- 12 -
1.2.2 Mieův rozptyl	- 14 -
1.3 Nelineární rozptyly světla	- 15 -
1.3.1 Brillouinův rozptyl	- 15 -
1.3.2 Ramanův rozptyl	- 18 -
1.4 Stimulované nelineární rozptyly světla	- 19 -
1.4.1 Stimulovaný Brillouinův rozptyl	- 19 -
1.4.2 Stimulovaný Ramanův rozptyl	- 21 -
2 Optická vlákna	- 23 -
2.1 Rozdělení optických vláken	- 24 -
2.1.1 Jednovidová vlákna	- 25 -
2.1.2 Mnohovidová vlákna	- 25 -
3 Aplikace rozptylů v optických vláknech	- 27 -
3.1 OTDR založený na Rayleighho rozptylu	- 27 -
3.2 Distribuované optické systémy založeny na nelineárních jevech	- 27 -
3.2.1 DSTS (Distributed Strain and Temperature Sensing)	- 30 -
3.2.2 DTS (Distributed Temperature Sensing)	- 30 -
4 Praktická část	- 32 -
4.1 Použitý měřicí přístroj	- 32 -
4.2 Příprava vláken na měření	- 33 -
4.2.1 Uchycené vlákno	- 33 -
4.2.2 Neuchycené (volné) vlákno	- 39 -
4.3 Schéma měření a ukázka měřicího pracoviště	- 40 -
4.4 Kalibrace přístroje	- 41 -
4.5 Použitá vlákna a naměřené výsledky	- 44 -
4.5.1 Vlákno č. 1	- 46 -

Seznam použitých zkratek

4.5.2	Vlákno č. 2	- 48 -
4.5.3	Vlákno č. 3	- 50 -
4.5.4	Vlákno č. 4	- 52 -
4.5.5	Vlákno č. 5	- 54 -
4.5.6	Nový způsob uchycení vláken.....	- 56 -
Závěr		- 61 -
Použitá literatura		- 63 -
Seznam příloh.....		- 65 -

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
BER	Bit Error Rate	Bitová chybovost
BF	Brillouin Frequency	Brillouinovská frekvence
DSTS	Distributed Strain and Temperature Sensing	Distribuované snímání napětí a teploty
DTS	Distributed Temperature Sensing	Distribuované snímání teploty
IR	Infrared	Infračervené
MM	Multi Mode	Mnohovidové
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry	Metoda zpětného rozptylu
SBS	Stimulated Brillouin Scattering	Stimulovaný Brillouinův rozptyl
SM	Single Mode	Jednovidové
SRS	Stimulated Raman Scattering	Stimulovaný Ramanův rozptyl
UV	Ultraviolet	Ultrafialové
VOS	Fiber Optic Sensor	Vláknový optický senzor

Úvod

Zadání této diplomové práce zahrnuje tři body. Prvním bodem zadání je popsat princip DSTS systémů. Druhým bodem zadání je změřit Brillouinovské frekvence pro různé typy optických vláken v závislosti na teplotě. Třetím a zároveň posledním bodem zadání je vyhodnotit získané teplotní závislosti a stanovit empirické relace, které popisují tuto závislost. Vypracování práce obsahuje mimo úvod a závěr čtyři kapitoly, kde první tři kapitoly jsou věnovány teoretické části a čtvrtá kapitola je věnována praktické části. Nyní následuje stručný popis jednotlivých kapitol.

První kapitola se věnuje rozptylu světla. V úvodu je krátce popsáno světlo a jeho zařazení z hlediska elektromagnetického záření. Následuje obecný popis rozptylu světla. Dále jsou rozptyly rozděleny na lineární a nelineární. Z důvodu zařazení této práce je větší pozornost věnována nelineárním rozptylům (Brillouinův a Ramanův rozptyl). Podstatně menší část je věnována lineárním rozptylům (Rayleighův a Mieův rozptyl), jež nejsou k této práci nutně důležité a jsou popsány pouze stručně. Vznik a výkon rozptýleného záření je u nelineárních rozptylů silně zvýšen, pokud je překročena prahová hodnota výkonu (jedná se o tzv. stimulování). Proto jsou v první kapitole popsány i stimulované nelineární rozptyly, jež nachází využití u distribuovaného snímání teploty resp. u distribuovaného snímání mechanického napětí a teploty.

Druhá kapitola popisuje základní vlastnosti a princip optických vláken. Tato kapitola je pouze stručná a jsou uvedeny pouze základní informace o optických vláknech, jako jsou rozměry, použité materiály nebo jakým způsobem se šíří světlo optickým vláknem. Také je uvedeno základní rozdělení a stručná charakteristika jednotlivých typů optických vláken.

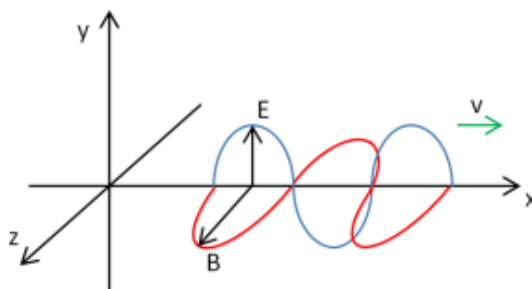
Třetí kapitola vychází z předchozích dvou kapitol. V této kapitole jsou popsány aplikace rozptylů v optických vláknech. Na začátku této kapitoly je popsána optická reflektometrie, tedy OTDR, jež je založena na Rayleighovu rozptylu. Zbylá část této kapitoly je věnována distribuovaným systémům, které jsou založeny na nelineárních jevech – distribuované snímání mechanického napětí a teploty (DSTS) využívající ke své činnosti stimulované Brillouinova rozptylu a distribuované snímání teploty (DTS) využívající ke své činnosti stimulované Ramanova rozptylu.

Čtvrtá kapitola se týká praktické části práce. Na začátku této kapitoly je uveden cíl této práce. Následuje stručný popis použitého měřicího přístroje. Jelikož vlákna byla měřena dvojím způsobem, a to uchycená a neuchycená (volná), je proto část čtvrté kapitoly věnována popisu přípravy optických vláken na měření. Následuje část, kde je zobrazeno schéma měření, a také ukázka měřicího pracoviště. Jelikož před každým měřením bylo nutné kalibrovat měřicí přístroj, je zde část, která tento děj stručně popisuje. Po popisu kalibrace jsou uvedeny použítá optická vlákna, a také výsledky z měření. Bylo měřeno pět typů optických telekomunikačních vláken a ke každému z nich jsou uvedeny dva grafy, tři tabulky a dopočítané teplotní koeficienty. Jelikož vlákna byla uchycena vždy stejným způsobem, tak na závěr bylo vyzkoušeno měření s jiným uchycením, kdy byla k uchycení použita menší vrstva lepidla. Toto měření bylo provedeno pouze u jednoho z pěti použitých optických vláken. Po čtvrté kapitole následuje závěr práce, kde je celá práce shrnuta.

1 Rozptyl světla

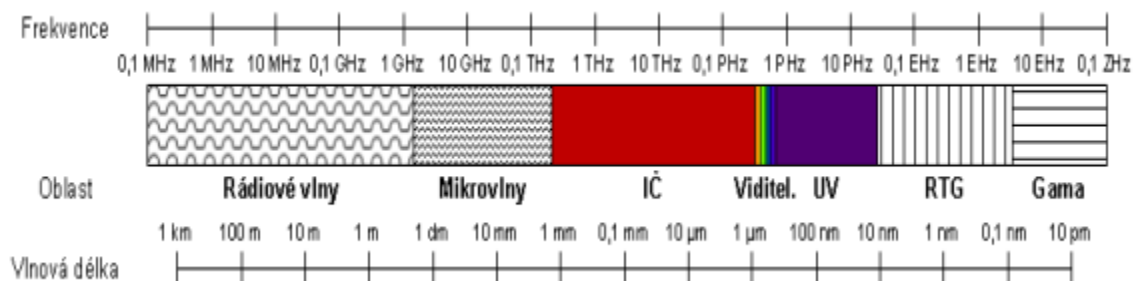
Tato kapitola se věnuje rozptylu světla, a tak je na začátek vhodné si připomenout, co to vlastně světlo je. Světlem bývá označována část spektra příčného elektromagnetického záření s velmi vysokou frekvencí. Světlo je díky velikosti své vlnové délky viditelné lidským okem. Vlnová délka této části spektra elektromagnetického záření odpovídá hodnotám v rozmezí od 380 nm do 780 nm [3]. Každé oko má ovšem své limity mírně odlišné a vnímání barev bývá individuální [7]. Typické lidské oko má maximální citlivost na zelenou barvu, která má vlnovou délku 555 nm. V optických komunikacích se často do světla zahrnuje i část spektra, jež nejsme schopni okem vnímat.

Světlo lze popsat několika způsoby v závislosti na tom, jaké jevy chceme popsat. Nejstarším a také nejjednodušším popisem je popis paprskový. U paprskového popisu se na světlo nahlíží jako na paprsky, které se šíří přímočaře od zdroje v homogenním prostředí. Paprskový popis ovšem není schopný popsat např. interferenci světla. Interferenci světla je možné popsat pomocí vlnového popisu. U vlnového popisu se světlo považuje za elektromagnetickou vlnu, popsanou Maxwellovými rovnicemi. Posledním popisem je popis kvantový, kde světlo považujeme za proud částic s nulovou klidovou hmotností - fotonů [3].



Obrázek 1.1: Příčné elektromagnetické vlnění [6]

Na obrázku 1.1 je znázorněn způsob šíření příčného elektromagnetického vlnění, při kterém v navzájem kolmých rovinách kmitají elektrické pole (bývá charakterizované elektrickou intenzitou E) a magnetické pole (charakterizované magnetickou indukcí B). Kromě viditelného spektra, tedy světla, má elektromagnetické záření i jiné oblasti, kterými jsou rádiové záření, mikrovlny, infračervené záření, ultrafialové záření, rentgenové záření a záření gama. Jednotlivé oblasti se liší frekvencí, mají tudíž i jinou délku vlny neboli vlnovou délku. Přehled všech oblastí je znázorněn na obrázku 1.2 [3].



Obrázek 1.2: Spektrum elektromagnetického záření [3]

1.1 Popis rozptylu světla

Pod pojmem rozptyl světla se rozumí jev vedoucí na změnu směru šířících se fotonů. Jako rozptyl světla se tedy považuje změna směru světelného paprsku, jež je následně vychýlen ze své dřívější trasy. Rozptyl světla (lze se také setkat s označením difúze světla) vzniká odchýlením světla od původního směru malými částicemi. Tyto částice mohou být pevné, kapalné i plynné. U částic, které jsou menší, než je vlnová délka procházejícího světla, se mění směr difrakcí (ohybem světla). U větších částic se světlo odráží [8].

Elektrické pole elektromagnetické vlny, která se šíří prostředím, působí na elektrony atomů nebo molekul. Tyto elektrony následně vyzařují sekundární vlny. Jinak řečeno jsou tedy centry sférických vln, které se šíří do všech směrů. Šíření těchto vln je doprovázené rozptylem světla. Rovinná světelná vlna se v homogenním prostředí šíří pouze v přímém směru, do stran se tudíž nerozptyluje. Výsledek složení všech sekundárních vln souvisí s jejich koherencí.

Pomocí podrobnějšího rozboru je možné dokázat, že skládání sekundárních vln v homogenním prostředí dává pouze přímou vlnu za podmínky, že všechny sekundární zdroje jsou totožné. Tato podmínka je splněna u ideálního homogenního prostředí, kde se světlo nerozptyluje. Pokud je homogenita prostředí narušená, málo rozptýlené světlo představuje pouze malou část původního svazku. Ve vysoce kvalitním skle nebo v čisté vodě svazek světla, který se šíří tímto prostředím nelze vidět při pohledu z boku. Pokud jsou ale ve vodě malé bublinky vzduchu, anebo se ve vodě nachází malé rozptýlené částice, tak je situace opačná [1]. Z pohledu makroskopického je rozptyl světla podmíněný jen nehomogenitou prostředí. Rozptyl světla je možný pozorovat i za předpokladu, kdy v prostředí jsou rozptýlené částice menší než je vlnová délka světla. V tomto případě tyto částice nelze možno vidět okem. Takové prostředí se nazývá matné prostředí [6].

Rozptyly světelného záření stejně jako absorpce (vlastní i nevlastní) a ohyby (mikroohyby i makroohyby) způsobují v optických vláknech nežádoucí jev, kterým je útlum [10]. Pod pojmem útlum se rozumí pokles optického výkonu signálu v optickém vlákne. Výkon světla, jež vstupuje do optického vlákna, není shodný s výkonem světla, který z vlákna vystupuje [9].

Rozptyl světla se dá rozdělit na dvě skupiny, a to lineární rozptyl (také nazýváno pružný nebo elastický) a nelineární rozptyl (také nazýváno nepružný nebo neelastický). Do první skupiny, tedy do lineárního rozptylu, patří rozptyl Rayleighův a rozptyl Mieův. Do skupiny druhé, tudíž do nelineárního rozptylu, patří rozptyl Ramanův a rozptyl Brillouinův. Rozdíl mezi těmito dvěma skupinami rozptylů spočívá v tom, zda se mění či nemění po rozptylu vlnová délka záření (taktéž i frekvence záření) [1].

1.2 Lineární rozptyly světla

Prvním typem rozptylu světla je lineární rozptyl světla. Při tomto rozptylu je shodná vlnová délka světla před rozptylem s vlnovou délkou světla po rozptylu. Délka vlny elektromagnetického záření se tedy rozptylem nezmění [6].

1.2.1 Rayleighův rozptyl

Roku 1869 anglický fyzik John Tyndall experimentálně studoval zákonitosti rozptylu světla v kapalných prostředích. O 33 let později, v roce 1899, je teoreticky vysvětlil rovněž anglický fyzik

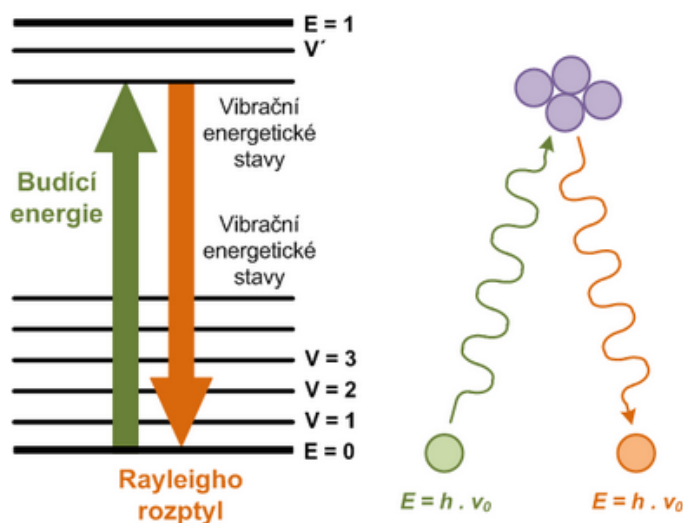
John Rayleigh. Jedná se o elastický rozptyl světla probíhající na částicích, které mají mnohem menší velikost, než je velikost vlnové délky rozptýleného záření.

"Rayleigh dokázal, že intenzita rozptýleného světla jako funkce souřadnic r a úlu β tj. $I(r, \beta)$ je přímo úměrná čtvrté mocnině kruhové frekvence světelné vlny ω^4 " [1]. Těž lze říci, že intenzita rozptýleného světla je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky λ^4 . Výsledek je dnes známý pod pojmem Rayleighův zákon. Platí, že čím je částice (jedná se o částici, na které se rozptyluje záření) větší, tím je i větší intenzita rozptýleného světla.

Krátkovlnné záření se rozptyluje více než záření s delší vlnovou délkou. Při rozptylu bílého světla v matném prostředí má následně rozptýlené světlo modrý odstín a světlo, které projde určitou vzdálenost takovým prostředím má nádech dočervena. To je například i důvod, proč je obloha modré barvy - v atmosféře vznikají rozptylem slunečních paprsků na molekulách vzduchu. Modrá barva má z viditelného spektra nejmenší vlnovou délku a je rozptýlena teda nejsilněji. Jestliže na rozptylující prostředí dopadá monochromatické světlo, přičemž nedochází ke změně vlnové délky, hovoříme o Rayleighovu rozptylu [1].

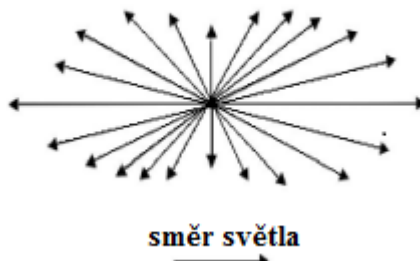
Rayleighův rozptyl je dominujícím jevem v oknech optické komunikace. Tento typ rozptylu vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky a nedá se odstranit (nepomůže ani ochlazení vlákna na absolutní nulu, protože při ní dojde k zamrznutí jednotlivých atomů v krystalické mřížce a světlo se následně kolem atomů ohýbá a vznikají rozptylové ztráty) [12]. Nehomogenity, které se nachází v optickém vlákne, se projevují jako fluktuace indexu lomu prostředí (oxidu křemíku SiO_2). Tyto nehomogenity jsou důsledkem hustoty, a také složením skla při jeho tunutí. Nehomogenity tedy vznikají při výrobě optických vláken. Nehomogenity nelze odstranit. Sekundární zdroje, které vznikají v místech fluktuace, září do všech směrů s totožnou pravděpodobností. V optickém vlákne se ale projeví jenom ty směry, u kterých je splněna mezní podmínka šíření [6].

"K rozptylu záření na molekulách dochází v okamžiku, kdy se foton vstupujícího záření srazí s molekulou zkoumané látky. Přibližně tisícina zářivého toku vstupujícího (budícího) záření se podílí na pružných srážkách fotonů budícího záření s molekulami zkoumané látky" [11].



Obrázek 1.3: Vznik Rayleighova rozptylu [11]

Na obrázku 1.3, který je na předchozí straně, je zobrazen vznik Rayleighova rozptylu. Při průběhu pružné srážky se energie (označována jako E) odraženého fotonu nezmění a u vzniklého rozptýleného záření tedy nedochází ke změně vlnové délky vůči záření budícímu. Foton záření se sráží s molekulou a v průběhu srážky se molekula dostává na virtuální excitovanou vibrační energetickou hladinu. Prakticky okamžitě však klesá zpět na původní základní energetickou hladinu. Tedy nedochází k žádnému pohlcení a k žádné emisi energie, foton po srážce s molekulou má totožnou energii (taktéž i frekvenci) jako před srážkou [11]. Na obrázku 1.4 lze vidět způsob Rayleighova rozptylu. Světlo se rozptyluje do všech stran. Zpětný a dopředný rozptyl mají trochu větší intenzitu rozptýleného světla [17].

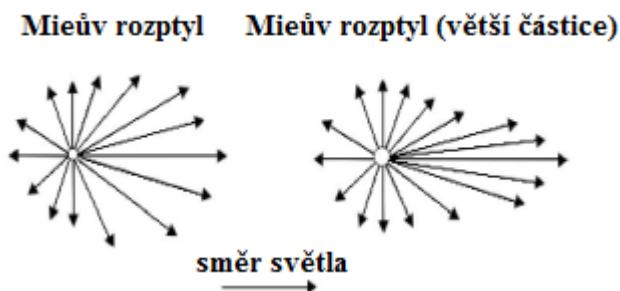


Obrázek 1.4: Rayleighův rozptyl [14]

1.2.2 Mieův rozptyl

Roku 1908 německý fyzik Gustav Mie poprvé publikoval článek ohledně teorie rozptylu světla, založenou na řešení Maxwellových rovnic [1]. Mieův rozptyl vzniká na nehomogenitách, které jsou srovnatelné s vlnovou délkou procházejícího záření. Tyto nehomogenity vznikají u optických vláken přímo při výrobě. Je velmi závislý na úhlu. Příčinami vzniku Mieova rozptylu jsou mikroskopické bublinky uvnitř optického vlákna, napětí ve vlákně, nečistoty ve vlákně, nedokonalá cylindrická struktura vlákna, kolísání průměru jádra vlákna a další hlediska srovnatelné s vlnovou délkou [12]. Mieův rozptyl se významně zvýší, pokud geometrické nepravidelnosti překročí $1/10$ vlnové délky [13].

Mieův rozptyl lze na rozdíl od Rayleighova rozptylu odstranit. Odstranění je provedeno použitím vhodné technologie při výrobě vláken. U dnešních kvalitních optických vláken se s tímto rozptylem již téměř nesetkáme [17]. Oproti Rayleighovu rozptylu je Mieův rozptyl obecnější, protože platí pro všechny poměry poloměrů vůči vlnové délce záření, ačkoli tato technika vede k sumě nekonečných sum. To že je Mieův rozptyl obecnější má za následek, že jeho popis je oproti Rayleighovu rozptylu matematicky náročnější. Mieův rozptyl se chová u jednotlivých částic jinak. To je možné vidět i na obrázku 1.5, kde je zobrazeno, že světlo se chová jinak při malých a při větších částicích. Při zvětšování velikosti částice, od které se záření rozptyluje, se rozptýlené světlo soustřeďuje více ve směru světla (dopředný směr) [14].



Obrázek 1.5: Mieův rozptyl [14]

1.3 Nelineární rozptyly světla

Druhým typem rozptylu světla je nelineární rozptyl světla. Při tomto rozptylu je odlišná vlnová délka světla před rozptylem oproti vlnové délce světla po rozptylu. Délka vlny elektromagnetického záření se tedy rozptylem mění.

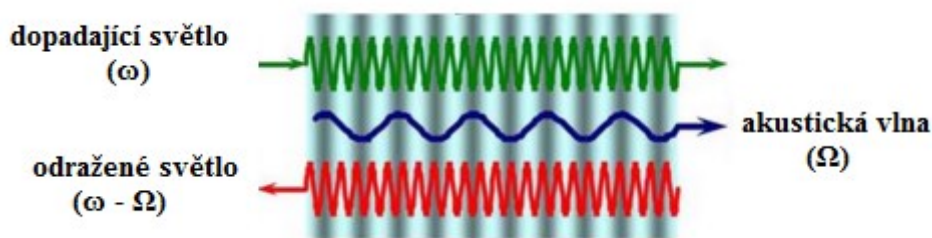
V podstatě se jedná o tzv. nelineární útlumové mechanismy, vznikající převážně pokud jsou optickými vlákny šířeny vyšší hustoty optického výkonu. *"Nelineární rozptyl způsobuje přechod optického výkonu z jednoho vidu do jiného, který se následně šíří stejným, nebo opačným směrem při jiné frekvenci"* [6]. Z toho lze vyvodit, že nelineární rozptyl je silně závislý na hustotě optického výkonu ve vlnovodech. Ke vzniku lineárního rozptylu v optických vláknech je potřeba výkon nad určitou (prahovou) hodnotou [6]. Molekulární rozptyl se stal předmětem intenzivního výzkumu ve dvacátých a třicátých letech 20. století. Dnes rozptyl optických fotonů (kvantové stavy mřížkové vibrace) je známý jako Ramanův jev, zatímco interakce světla s akustickými fotony je známá jako Brillouinův rozptyl [18].

1.3.1 Brillouinův rozptyl

Roku 1922 francouzský fyzik Léon Brillouin teoreticky předpověděl rozptyl světla tepelně vybuzenými akustickými vlnami (akustické fonony) [18]. Studium stejné problematiky se zabýval i ruský fyzik Leonid Mandelštam. Mandelštam ovšem publikoval své nápady až v roce 1926, tedy po Brillouinovy. Mimo název Brillouinův rozptyl se lze setkat i s názvem Brillouinův-Mandelštamův rozptyl [1].

Brillouinův rozptyl je jedním z nejvýznamnějších optických jevů. Rozptýlená vlna má sníženou frekvenci oproti původní vlně. Jedná se o Stokesovu vlnu (pojmenováno poté co George Stokes objevil v 19. století snížení frekvence u jevu luminiscence). Rozptýlené světlo má jisté úhlové rozdělení, ale geometrie vlákna volí pouze dva výhodné směry - dopředný a zpětný. Brillouinův rozptyl je v optických vláknech příliš slabý. Proto se Stokesova vlna šíří zejména ve směru opačném, tedy ke vstupu nebo k čerpacímu zdroji (zpětný rozptyl). Na určité úrovni čerpacího zdroje se proces stává stimulovaným, to znamená, že Brillouinův rozptyl je silně závislý na zdroji. To se vyznačuje efektivní přeměnou energie ze vstupního světla na zpětně odraženou vlnu [18]. Stimulovaný Brillouinův rozptyl je blíže popsán v kapitole 1.4.1 této práce.

Světelná (elektromagnetická) vlna je schopna v tuhých látkách (kapaliny nebo plyny) integrovat s odlišnými typy vln - například může integrovat s akustickými vlnami nebo v magnetické látce se spinovými vlnami apod. Na vznik akustických vln v optických vláknech mají velký vliv tepelné vibrace molekul. Lze tedy říci, že na interakci světa spolu s fotony se účastní i akustické fotony [1]. Během pružné deformace prostředí se mění index lomu prostředí. *"Proto deformace prostředí v prostoru a čase způsobená přítomností akustických vln má vliv na šíření elektromagnetických vln"* [6]. Fázová rychlost akustických vln v porovnání s rychlostí světla je v tuhých látkách $v_A/c \approx 10^{-5}$. Proto na interakci světelné vlny s akustickou vlnou lze nahlížet jako na difrakci světelné vlny na pomalu se pohybující mřížce s periodicky se měnícím indexem lomu n akustickou vlnou.



Obrázek 1.6: Brillouinův rozptyl [19]

Na obrázku 1.6 je zobrazen princip Brillouinova rozptylu. Akustická vlna způsobuje změnu indexu lomu ve vlákne. Dopadající světlo se následně odráží zpět, ovšem se změněnou frekvencí [19].

Při pohledu na rozptyl jako na kvantově-mechanickou interakci akustické a optické vlny, šířící se světlo si lze představit jako soubor fotonů - částic s energií jednoho fotonu [1]:

$$E_F = \hbar \cdot \omega_F \quad (1.1)$$

a impulzem:

$$P_F = \hbar \cdot k_F, \quad (1.2)$$

kde ω_F je kruhová (úhlová) frekvence světelné vlny, k_F je její vlnový vektor, \hbar - je redukovaná Planckova konstanta (vypočítá se jako $\hbar = h / 2 \cdot \pi$).

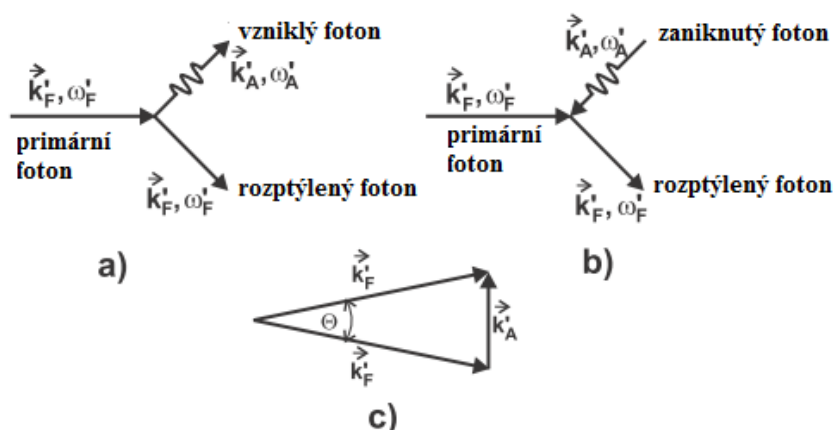
Na akustickou vlnu pohlížíme jako na soubor fotonů - částic s energií:

$$E_A = \hbar \cdot \omega_A \quad (1.3)$$

a impulzem:

$$p_A = \hbar \cdot k_A, \quad (1.4)$$

kde ω_A je kruhová frekvence akustické vlny, k_A je její vlnový vektor. Přesněji podle teorie tuhých látek hovoříme o kvazičásticích a kvaziimpulzu.



Obrázek 1.7: Vznik fotonu (a), zánik fotonu (b) a trojúhelník tvořený vlnovými vektory světelné vlny (c) [1]

Pokud pohlédneme z pohledu kvantové mechaniky na interakci světelné vlny s látkou, tehdy nahlížíme jako na proces, kdy foton dává vznik novému fotonu a jednomu fotonu nebo opačně - foton a foton dávají vznik novému fotonu. To lze vidět i na obrázku 1.7 (předchozí strana), kde první část obrázku (a) zobrazuje vznik (kreaci) fotonu, část druhá (b) zobrazuje zánik (anihilaci) fotonu a na třetí části obrázku (c) je zobrazen rovnoramenný trojúhelník, který je tvořený vlnovými vektory světelné vlny před rozptylem a po rozptýlu a vlnovým vektorem akustické vlny.

Obdobně jako ve všech jiných procesech, tak i při těchto procesech je nutné, aby byl splněn zákon zachování energie, a také zákon zachování impulzu. Součet energie fotonu s energií fotonu před srážkou je roven energií vzniknuté částice (rozptýleného fotonu) po srážce. Obdobně to platí i pro impulz. Matematické vyjádření [1]:

$$\hbar \cdot \omega_F \pm \hbar \cdot \omega_A = \hbar \cdot \omega'_F, \quad (1.5)$$

$$\hbar \cdot k_F \pm \hbar \cdot k_A = \hbar \cdot k'_F. \quad (1.6)$$

V předchozích rovnicích (1.5 a 1.6) je znaménko + platné pro vznik fotonu a znaménko - je platné pro zánik fotonu. ω'_F představuje kruhovou frekvenci rozptýlené vlny a k_F představuje její vlnový vektor. Jestliže zvážíme, že $\omega_F = c \cdot k_F$, $\omega'_F = c \cdot k'_F$, $\omega_A = v_A \cdot k_A$, tak pro rozptyl světla na akustické vlně musí platit tyto vztahy:

$$k'_F = k_F \pm k_A, \quad (1.7)$$

$$\frac{c \cdot k'_F}{n'} = \frac{c \cdot k_F}{n} \pm v_A \cdot k_A. \quad (1.8)$$

$n'(\omega'_F)$ a $n(\omega_F)$ reprezentují absolutní indexy lomu prostředí pro rozptýlenou a pro primární světelnou vlnu. Protože $v_A \ll c$, tak ze vztahu (1.8) plyne, že $k_F \cong k'_F$ (porovnatelné), lze tedy považovat trojúhelník, který je tvořen vektory k'_F , k_F , k_A za přibližně rovnoramenný. Proto vztah mezi vlnovým vektorem akustické vlny a úhlem rozptylu zní:

$$k_A = 2 \cdot k_F \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (1.9)$$

frekvence akustické vlny bude daná:

$$\omega_A = 2 \cdot \omega_F \cdot n(\omega_F) \cdot \frac{v_F}{c} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (1.10)$$

K největší změně frekvence dochází, když se rozptýlená vlna šíří zpět, tedy když $\Theta = \pi$. Tehdy bude frekvence akustické vlny ω_A maximální (cca 10^{10} s^{-1}). Ze vztahu (10.6) můžeme určit frekvenci rozptýlené vlny, pokud dosadíme za vlnové čísla (vlnové vektory) poměr příslušné kruhové frekvence a rychlosti šíření. Frekvence rozptýlené vlny poté bude:

$$\omega'_F = \omega_F \pm \omega_A. \quad (1.11)$$

Ze vztahu 10.11 vidíme, že v rozptýleném světle je možné, že se objeví satelitní čáry s frekvencemi $(\omega_F + \omega_A)$. Jedná se o tzv. anti-Stokesovy složky. Dále se mohou objevit Stokesovy složky $(\omega_F - \omega_A)$ [1].

1.3.2 Ramanův rozptyl

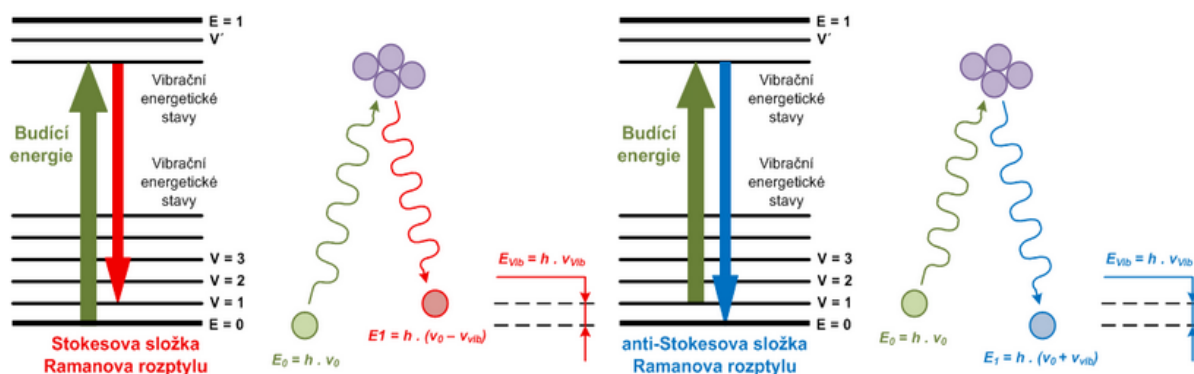
Roku 1928 indický fyzik Chandrasekhara Venkata Raman poprvé publikoval Ramanův rozptyl. Raman později za tento objev dostal Nobelovu cenu [15]. Objevení Ramanova rozptylu bylo učiněno při hledání optické analogie Comptonova jevu. Později se ukázalo, že jev zvaný Ramanův rozptyl byl předpovězen o 5 let dříve, tedy v roce 1923, a to rakouským fyzikem Adolfem Smekalem. Ramanův rozptyl představuje oboustranné působení světelného pulzu s teplotně nabuzenými atomovými nebo molekulovými vibracemi [18].

Při rozptylu záření na molekulách převážná část rozptýleného záření má totožnou vlnovou délku stejně jako původní záření (tzn. elastický rozptyl). Ovšem u malé části rozptýleného záření se vlnová délka mění oproti budícímu záření. Tato malá část budícího záření (přibližně 10^{-8}) se podílí nepružných srážek fotonů s molekulou (u pružných srážek to byla tisícina, tedy 10^{-3}). Pokud dojde k nepružné srážce, dopadající foton předá část svojí energie molekule nebo od ní určité kvantum energie přijme. Rozptýlené záření tímto způsobem bude mít na rozdíl od budícího záření jinou frekvenci.

U nepružných srážek fotonů a molekul nedochází ke změně kinetické energie, ale jenom vnitřní energie zúčastněných molekul. Změna vnitřní energie molekule se projeví jako přechod z nižšího do vyššího vibračního (vibračně-rotačního) stavu nebo jestliže je její přechod z vyššího vibračního stavu do nižšího. Rozdíl mezi frekvencemi budícího záření a rozptýleného záření se značí jako Ramanův posun. Ramanův posun odpovídá frekvenci daného pásu v Ramanově spektru. K zaznamenání změny frekvence rozptýleného záření je potřeba použít k buzení Ramanova rozptylu monochromatické záření.

U neelastické srážky fotonu budícího záření s molekulou je možné, že dojde ke změně energie fotonu (zvýšení i snížení). Pokud dojde ke snížení energie, tak foton předá molekule jisté kvantum své energie. Takové kvantum umožní molekule, aby přešla do vyššího vibračního stavu. Po srážce má foton nižší hodnotu energie, tedy i frekvence je nižší. Daný pás bude v Ramanově spektru posunut od pásu budícího záření k nižším energiím do tzv. Stokesovy oblasti (viz obrázek 1.8, který je zobrazen na následující straně). Na obrázku je znázorněna červená šipka, která značí posun k nižším frekvencím.

Foton se sráží s molekulou a během této srážky se molekule dostává na virtuální excitovanou vibrační energetickou hladinu. Následně klesá na vibračně energetickou hladinu (ta je oproti základní hladině vyšší). Po srážce molekuly s fotonem molekula zůstane v excitovaném vibračním stavu. Potřebná energie pro udržení molekuly v tomto stavu je odebrána fotonu. Ten má následně po srážce nižší energii (i frekvenci). Pokud ovšem foton energií zvyšuje, tak energií získává od molekuly. Velikost obdržené energie je stejná s energetickým kvantem, které molekula při přechodu z energetické hladiny uvolňuje. Po srážce má foton vyšší frekvenci a tedy i energii. Odpovídající pás bude posunut od pásu budícího záření k vyšším energiím v Ramanově spektru do tzv. anti-Stokesovy oblasti. Na obrázku 1.8 (další strana) je tento posun znázorněn modrou šipkou. Posun je směrem k vyšším kmitočtům, tedy ke kratším vlnovým délkám [11].



Obrázek 1.8: Vznik Ramanova rozptylu ve Stokesově oblasti a v anti-Stokesově oblasti [11]

1.4 Stimulované nelineární rozptyly světla

Stimulované nelineární rozptyly světla vychází z nelineárních rozptylů světla, jež byly popsány na předchozích stranách (tedy z Brillouinova a Ramanova rozptylu). U obou zmíněných nelineárních rozptylů se vznik a výkon rozptýleného záření silně zvyšuje, pokud je překročena jistá prahová hodnota. Tento děj si lze vysvětlit tím, že nově vzniklé fotony nelineárním rozptylem jsou schopné dále stimulovat (tzn. podpořit) vznik fotonů nových. Pokud k tomuto ději dochází, rozptyl je stimulován, a mluvíme tedy o stimulovaném Ramanově rozptylu (dále jen zkráceně SRS - z angličtiny Stimulated Raman Scattering) a stimulovaném Brillouinovu rozptylu (dále jen zkráceně SBS - z angličtiny Stimulated Brillouin Scattering) [17]. Nelineární rozptylové jevy v optických vláknech vedou vzhledem k neelastickým rozptylům fotonu k nižší energii fotonu. Rozdíl energie je absorbován vibrací molekul nebo fotony v prostředí. Jinými slovy lze konstatovat, že energie světelné vlny se přenesla do jiné vlny, která je na vyšší vlnové délce (má tedy nižší energii) [16].

Brillouinův rozptyl může být omezujícím faktorem u nízko rychlostních optických systémů, protože nebude možné do vlákna navázat větší výkon než prahový, přebytečný výkon se bude šířit směrem k začátku vlákna ve formě zpětného rozptylu. Ramanův rozptyl je oproti Brillouinovu rozptylu všesměrový a při překročení prahového výkonu se sice část rozptýleného záření šíří stejně jako pracovní optický signál ve směru dopředném, ale změní se jeho vlnová délka (jedná se o ztrátu energie na pracovní vlnové délce). Mimo to se část z rozptýlené energie vyváže z optického vlákna ven a část se vrací zpět na začátek vlákna. Ramanův rozptyl může způsobovat problémy u širokopásmových DWDM systémů, kde se záření kanálů, které má kratší vlnovou délku, začne silně rozptylovat, protože bude stimulováno zářením nižších kanálů. Kanály, jež jsou položené výše, budou tedy více tlumené. Tento efekt lze ovšem využít v náš prospěch. Pokud je do SM vlákna současně s přenášenými kanály navázán ještě zdroj záření o velkém výkonu (řádově několik W), který bude mít vhodnou vlnovou délku, typicky přibližně o 100 nm nižší než je střed celého optického pásma přenášených kanálů, poté bude možné díky SRS jevu aktivně zesílit všechny kanály. Ramanův jev se dá použít ke konstrukci optického zesilovače, což se v dnešní době začíná čím dále více uplatňovat [17].

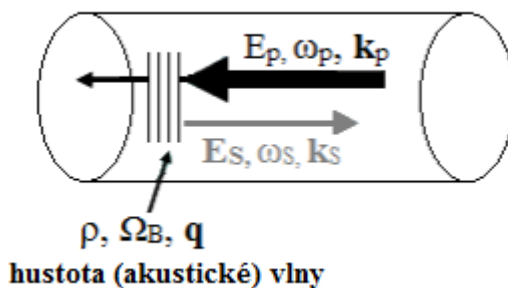
1.4.1 Stimulovaný Brillouinův rozptyl

Ačkoliv spontánní Brillouinův rozptyl byl předpovězen v roce 1922, stimulovaný proces, kdy akustická vlna je vytvořena samotným světleným paprskem, byl pozorovaný v roce 1964. SBS je nelineární proces, tj. jeho účinnost je závislá na vstupní energii. Energie vstupního signálu, při kterém

energie Stokesovy vlny se rapidně zvyšuje a může být dokonce srovnatelný se vstupní úrovní, se nazývá prahová hodnota nebo zjednodušeně práh SBS [18]. SBS je dominantním jevem v optických vláknech [16].

Nejvýznamnější původ stimulovaného Brillouinova rozptylu je fyzický jev zvaný elektrostriktce, který se projevuje změnou hustoty prostředí působením světla. Posun frekvence na nižší úroveň Stokesovy vlny lze také vysvětlit Dopplerovým jevem. Se zvyšující se intenzitou Stokesovy vlny se interferenční obrazec stává výraznější a akustická vlna zvyšuje amplitudu. Přední šíření akustické vlny se chová jako Braggovská mřížka, která zpětně rozptyluje světlo ještě více [18].

Dopadající vlna s amplitudou E_p , frekvencí ω_p a vlnovým vektorem k_p se rozptýlí o ustupující zvukovou vlnou s amplitudou ρ , frekvencí ω_B a vlnovým vektorem q a následně vytváří rozptýlenou vlnu s amplitudou E_s , frekvencí ω_s a vlnovým vektorem k_s . Tento děj je zobrazen na obrázku 1.9 [4].



Obrázek 1.9: Stimulovaný Brillouinův rozptyl v optickém vlákně [4]

Musí být zachován zákon o zachování energie a hybnosti, vlnové vektory a frekvence čerpajících, rozptýlených a akustických polí jsou dané následujícími vztahy [16]:

$$\Omega_B = \omega_p - \omega_s, \quad (1.12)$$

$$q = k_p - k_s. \quad (1.13)$$

ω_p reprezentuje frekvenci čerpajícího pole, ω_s reprezentuje frekvenci Stokesova pole. Vlnový vektor čerpajícího zdroje se značí k_p a vlnový vektor Stokesova pole se značí k_s . Ω_B je označení pro Brillouinovu frekvenci a q je označení pro vektor akustického pole. Vztah mezi Brillouinovou frekvencí a vektorem akustického pole je následující:

$$\Omega_B = |q|v_A \approx 2v_A|k_p|\sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (1.14)$$

kde v_A reprezentuje rychlost zvuku v médiu a θ reprezentuje úhel, který svírá čerpající a Stokesovo pole. V jednovlakovém vlákně nabývá tento úhel pouze dvou hodnot, a to 0 a π . Z tohoto důvodu je Brillouinův frekvenční posun daný následujícím vztahem:

$$v_B = \frac{2nv_A}{\lambda_p}. \quad (1.15)$$

Symbol n reprezentuje index lomu jádra v optickém vlákně, λ_p je vlnová délka čerpajícího světla.

Prahová hodnota výkonu, který je navázán do optického vlákna a vzniká při něm SBS, se vyjádří dle následujícího vztahu [16]:

$$P_{th} \approx \frac{21bA_{eff}}{g_B L_{eff}}. \quad (1.16)$$

Symbol b značí polarizační faktor (jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 1 až 2, závisí na polarizaci čerpající a Stokesovy vlny), A_{eff} reprezentuje efektivní průřez jádra optického vlákna, g_B je koeficient Brillouinova zisku a L_{eff} je efektivní délka vlákna. Pro typické hodnoty ($A_{eff} \approx 50 \mu m^2$, $L_{eff} \approx 20 km$ a $g_B = 4 \cdot 10^{-11} m/W$, $b = 1$ a vlnová délka je 1550 nm) je prahový výkon přibližně roven 1,3 mW [16].

1.4.2 Stimulovaný Ramanův rozptyl

Stimulovaný Ramanův rozptyl je prahový jev vznikající, pokud intenzita čerpající světelné vlny o frekvenci ω_p dopadá na látkové prostředí a je vyšší než prahová hodnota ($I_p \geq I_{thr}$). Pokud je tato podmínka splněna, tak se Stokesova vlna o frekvenci $\omega_s = \omega - \omega_M$ při šíření prostředím exponenciálně zesiluje. K nalezení prahu SRS bychom měli uvažovat o nelineární interakci mezi čerpající vlnou a Stokesovou vlnou. Tato interakce je popsána soustavou dvou rovnic [5]:

$$\frac{\partial I_s}{\partial z} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s, \quad (1.17)$$

$$\frac{\partial I_p}{\partial z} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_r I_p I_s - \alpha_p I_p. \quad (1.18)$$

I_p značí intenzitu čerpající vlny, I_s reprezentuje intenzitu Stokesovy vlny, g_r je účinnost Ramanova zisku, α_s reprezentuje ztráty v optickém vlákne na Stokesově frekvenci a α_p reprezentuje ztráty ve vlákne na čerpající frekvenci. V případě absence ztrát:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{I_s}{\omega_s} + \frac{I_p}{\omega_p} \right) = 0. \quad (1.19)$$

Vztah 1.19 říká, že celkový počet fotonů v čerpajícím a Stokesovu paprsku zůstává během SRS konstantní. Prah intenzity čerpajícího záření je závislý na zisku v Ramanově médiu a na délce oblasti čerpání. Bylo dokázáno, že SRS se vytvoří ze spontánního Ramanova rozptylu na celé délce vlákna. Efektivní délka vlákna je dána následujícím vztahem:

$$L_e(z) = \frac{1-e^{-\alpha z}}{\alpha} \approx \frac{1}{\alpha}. \quad (1.20)$$

Symbol α značí ztráty v optickém vlákne. Symbol z značí vzdálenost. Zatímco intenzita spontánního Ramanova rozptylu je o několik řádů nižší, než je intenzita budícího záření, intenzita stimulovaného Stokesova Ramanova záření je přibližně stejná jako intenzita budícího záření.

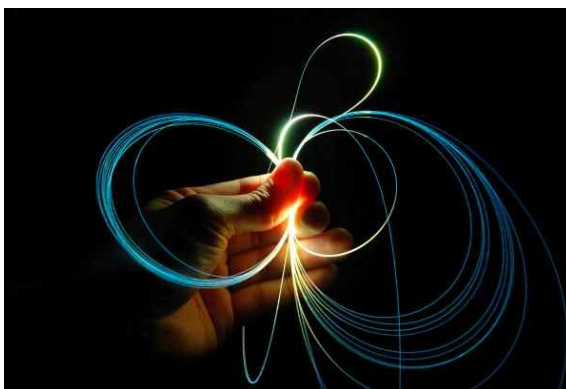
Stokesův výkon je definovaný s exponenciálním zesílením g jako [20]:

$$P_s(L) = P_s(0) \cdot e^{(g_r \cdot P(0) \cdot \frac{L_e}{A_e})}, \quad (1.21)$$

kde g_r značí účinnost Ramanova zisku, $P(0)$ je výkon čerpací vlny, L_e je efektivní délka vlákna, L_e reprezentuje efektivní délku vlákna, $P_s(0)$ značí výkon signálu a A_c je efektivní průřez jádra vlákna. Ramanův práh lze předpovědět celkem přesně. Pro dlouhé vlákna a $\ll 1$, $L_e \approx 1/a$, na vlnové délce 1550 nm, blízko které je minimální útlum vlákna (přibližně 0,02 dB/km), $L_e \approx 20 \text{ km}$ a typicky hodnotě $A_c = 50 \text{ }\mu\text{m}$, předpokládaný Ramanův práh je $P(0) \approx 600 \text{ mW}$ [5].

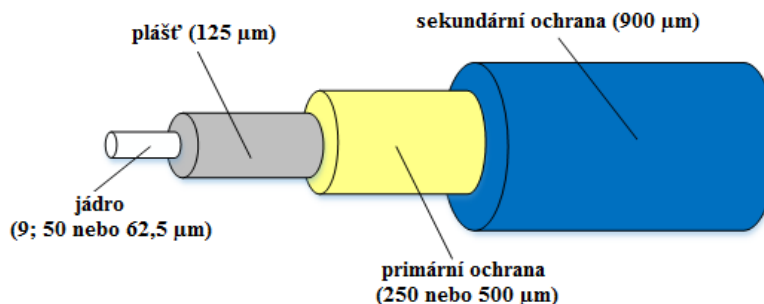
2 Optická vlákna

Jelikož distribuované systémy ke své činnosti využívají optická vlákna, tak druhá kapitola je věnována optickým vláknům. Optické vlákno (také označováno jako vlnovod) je přenosové médium, které umožňuje přenos optického záření s vlnovými délkami od 200 nm do 20 μm . Z hlediska spektra elektromagnetického záření tedy ultrafialové (UV), viditelné a infračervené (IR) záření. *"Rozmezí vlnových délek, pro které je vlákno vyráběno, je dáno konstrukcí a použitými materiály jádra a pláště"* [2]. Vlákná mají typicky rozsah provozních teplot od - 60 °C do + 120 °C, ovšem existují i vlákna s větším rozsahem teplot. Vlnovod je válcovitého tvaru, dále je tenký, lehký, ohebný, průhledný a má také velmi malé rozměry (řádově v mikrometrech), což lze vidět i na obrázku 2.1 [2].



Obrázek 2.1: Ukázka optického vlákna [22]

Optická vlákna mají především uplatnění v telekomunikacích, kde slouží převážně k dálkovým přenosům (oproti elektrickým kabelům mají menší útlum a dosahují vyšších přenosových rychlostí), ale mohou být použity i v metropolitních a místních sítích. Dále se dají využít v senzorce (kde jsou součástí vláknových optických senzorů), zdravotnictví, letectví, kosmonautice nebo u vojenských systémů. Vláknem je s pomocí různých vlnových délek schopno přenášet mnoho vzájemně nezávislých signálů. Vlnovod je imunní vůči elektromagnetickému rušení (vlnovody totiž nejsou elektricky vodivé), což je problém u metalických vedení. Vláknem bývá tvořeno jádrem, které obklopuje plášť. Okolo optického vlákna bývá ještě ochrana (primární nebo může být i sekundární). Optické záření se šíří jádrem a část se také může šířit pláštěm. Plášť zajišťuje vnitřní odraz. Primární a sekundární ochrana optického vlákna slouží k ochraně optického vlákna před zničením, a také umožňuje ohýbání vlákna, které je vyrobeno z křehkého skla. Ochrana bývá vyráběna z plastu. Na obrázku 2.2 je zobrazena struktura optického vlákna [2].



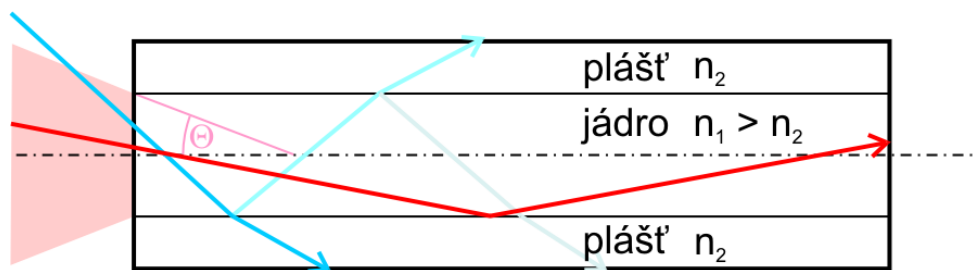
Obrázek 2.2: Struktura optického vlákna [21], [9]

Jádro i plášť bývají vyrobeny ze stejného materiálu. Tímto materiálem ve většině případů je křemenné sklo (SiO_2), a to díky nízké hodnotě útlumu, ovšem ve speciálních případech může být použit i průhledný plast (POF) nebo kombinace křemenného skla s plastem [9]. Chemické složení jádra a pláště se mírně liší přidáním jiného materiálu - často se využívá germanium, které zvyšuje index lomu. Pro zvýšení indexu lomu lze použít i fosfor; naopak ke snížení indexu lomu se využívá bór nebo fluor. Index lomu je parametr, který vyjadřuje poměr mezi rychlostí světla šířící se vakuem a rychlostí světla šířící se v daném materiálu. Index lomu jinde než ve vakuu bývá vždy větší než 1. Hodnoty indexu lomu v jednotlivých prostředích je možné dohledat v matematicko-fyzikálních tabulkách. Index lomu se značí n a vypočítá se podle rovnice 2.1 [2]:

$$n = \frac{c}{v} [-]. \quad (2.1)$$

Symbolem c je označována rychlost světla ve vakuu (299 792 458 m/s) a symbolem v je rychlost světla v daném prostředí. Protože se jedná o poměr veličin stejných jednotek, tak index lomu se udává bez jednotky. Index lomu jádra se značí n_1 a index lomu pláště se značí n_2 . V optických vláknech je bezpodmínečně nutné, aby index lomu jádra byl větší než index lomu pláště ($n_1 > n_2$).

Principem fungování optických vláken je jev zvaný totální reflexe. *"K totální reflexi dochází, jestliže světlo prochází z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí a rozhraní mezi těmito dvěma prostředími dosáhne pod úhlem menším než je kritický"* [2]. Následně se veškerá energie odrazí zpátky do prostředí, které je opticky hustější. To lze vidět i na obrázku 2.3, kdy paprsek znázorněn červenou čarou je do vlákna navázán pod menším úhlem než je kritický a proto jeho energie zůstává v jádře, kdežto paprsek označen modrou čarou je do vlákna navázán pod větším úhlem než je kritický, dochází tedy k lomu, kdy se zpět odrazí jen část paprsku (zbytek se láme ven). Kritický úhel je v obrázku označen znakem θ [2].



Obrázek 2.3: Princip přenosu paprsku optickým vláknem [23]

2.1 Rozdělení optických vláken

Optická vlákna se dají rozdělit z hlediska způsobu přenosu světelných paprsků na dva základní typy, a to na jednovidová a mnohovidová vlákna. Jak již vyplývá z názvů, tak rozdíl mezi těmito dvěma typy spočívá v tom, že jednovidová vlákna přenášejí pouze jeden vid (paprsek), zatímco mnohovidová vlákna přenášejí více vidů (paprsků). Mnohovidová vlákna se dále dělí na další dva typy - mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu a mnohovidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu. Princip šíření paprsků u jednotlivých typů vláken je znázorněn na obrázcích 2.4 a 2.5.

2.1.1 Jednovidová vlákna

Jednovidové vlákno se využívá u distribuovaného snímání mechanického napětí a teploty (DSTS). Často se lze setkat i s označením jednomódové vlákno nebo zkratkou SM (z angličtiny Single mode). Jednovidová vlákna mají oproti mnohovidovým vláknům daleko menší průměr jádra - přibližně 8 až 10 μm (nejčastěji se používá 9 μm). To má za důsledek, že takto tenkým jádrem prochází pouze jeden vid. Jednovidová vlákna se používají k vysokorychlostnímu přenosu dat na velmi dlouhé vzdálenosti. U jednomódových vláken nedochází k módové disperzi, protože se vláknem šíří pouze jeden mód. U SM vláken se světelné energie nešíří pouze jádrem, výrazná část se šíří také pláštěm vlákna. Vlákna jsou vyráběny pro šíření paprsku s vlnovými délkami v rozmezí 1260 až 1640 nm. Nejčastěji se ovšem využívají vlnové délky 1310 nm, kde je nejnižší disperze a 1550 nm, kde je nejnižší útlum. Největší výhodou SM vláken je, že oproti MM vláknům mají nižší útlum a dosahují vyšších přenosových rychlostí. Jednovidová vlákna mají ovšem i nevýhody. Kvůli malému průměru jádra vlákna jsou kladeny vyšší nároky na přesnost zdroje záření. Musí být použity laserové diody. Z důvodu malého průměru jádra jsou vlákna poměrně křehká a musí mít pevnější ochranu než mnohovidová vlákna [2].



Obrázek 2.4: Princip šíření paprsku u SM vlákna [24]

2.1.2 Mnohovidová vlákna

Mnohovidové vlákno se využívá u distribuovaného snímání teploty (DTS). Často se lze setkat i s označením mnohomódové vlákno nebo zkratkou MM (z angličtiny Multi mode). Mnohovidová vlákna jsou navržena k přenosu dat skrze více světelných paprsků, které se navazují do vlákna současně. Navázání mnoha paprsků lze provést díky daleko většímu průměru jádra vlákna, který se pohybuje mezi 50 až 100 μm . Používají se ovšem jádra s průměry 50 nebo 62,5 μm . Mnohovidová vlákna se používají ke komunikaci na krátkou vzdálenost. Kvůli většímu útlumu a módové disperzi mají daleko menší dosah (do 2 km) a přenosové rychlosti než SM vlákna. Díky větším průměrům jádra se s MM vlákny snadněji manipuluje při spojování a také se mohou použít levnější zdroje záření. Používají se LED diody. Ke komunikaci se používají vlnové délky 850 a 1300 nm [2].



Obrázek 2.5: Princip šíření paprsku u MM vlákna [24]

Jednotlivé typy mnohovidových vláken:

- Jádru se skokovou změnou indexu lomu - jádro vlákna má konstantní index lomu n_1 , plášť vlákna má index lomu n_2 . Paprsky se šíří tímto optickým vláknem po různých drahách. Nejkratší dráhu urazí paprsek přímý, paprsek o nejnižším vidu. Nejdelší dráhu urazí paprsek s úhlem odrazu na úrovni mezního úhlu (nejvyšší vid). Kvůli rozdílným drahám nedorazí paprsky k detektoru (tzn. na konec vlákna) ve stejný čas, ale dorazí postupně a přenos signálu se rozdělí do delšího časového úseku, než byl na vstupu. Vlivem rozdílného šíření paprsků dochází ve vlákně k módové (vidové) disperzi.
- Jádru s gradientní (postupnou) změnou indexu lomu - tato vlákna nemají jádra s konstantní hodnotou indexu lomu (hodnota se od středu jádra postupně snižuje). U vláken s postupnou změnou indexu lomu dochází k plynulé změně jednotlivých drah paprsků. Záření se šíří v prostředí s nižším indexem lomu rychleji než v prostředí s vyšším indexem lomu. *"Paprsky, které se šíří blíže plášti, kde má index lomu menší hodnotu, mají větší rychlost a celková doba jejich šíření vláknem na velké vzdálenosti se málo liší od doby šíření přímého paprsku, který prochází středem jádra a tedy prostředím s největší hodnotou indexu lomu"* [2]. U těchto typů vláken dochází k podstatnému zmenšení módové disperze oproti vláknům se skokovou změnou indexu lomu [2].

3 Aplikace rozptylů v optických vláknech

V této kapitole jsou popsány aplikace rozptylů světla u optických vláken. První podkapitola se zabývá OTDR. Je to z důvodu podobnosti s distribuovanými systémy, jež jsou založeny na nelineárních jevech (DSTS a DTS). DTS a DSTS jsou popsány v druhé podkapitole.

3.1 OTDR založený na Rayleigho rozptylu

Pod pojmem OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) se rozumí optická reflektometrie, která využívá Rayleigho rozptylu a Fresnelových odrazů [25]. Často se lze setkat i s pojmem metoda zpětného rozptylu. OTDR funguje na principu měření optického výkonu, jež je rozptýlen za pomoci lineárního Rayleigho rozptylu v různých bodech optického vlákna. Rozptýlený výkon se vrací zpátky na vstup vlákna [6]. Z toho vyplývá, že k měření pomocí metody OTDR stačí jen jeden konec optického vlákna. U klasické přímé metody měření je vždy nutné mít k měření obě strany optické trasy. Na jednom konci bývá umístěn zdroj záření a na druhém konci bývá umístěn měřič výkonu. Optická reflektometrie je tedy vysoce výhodná při měření dlouhých tras - k prvnímu náhledu stačí změřit trasu pouze z jedné trasy. Ovšem k měřením certifikovaným je již potřeba měřit trasu z obou stran, hlavně tedy, kdy jsou na trase přítomny zesilovací efekty, které se posuzují pouze z oboustranného měření [26].

Optickou reflektometrií lze měřit útlum vlákna, dále analyzovat útlum jak po úsecích, tak i na celé délce optického vlákna, lze i zjišťovat homogenitu podél vlákna, útlum na svarech či konektorech, změřit délku optického vlákna, a také současně lokalizovat případné poruchy v optické trase. Pomocí OTDR lze rovněž zjišťovat kontinuitu optické trasy. Fresnelovy odrazy na poruše či na konci vlákna jsou sice z pohledu měření nežádoucí, ovšem jsou vhodné pro měření délky trasy, a také k lokalizaci poruch. Fresnelovy odrazy nastávají při dopadu záření na rozhraní prostředí, které mají různý index lomu.

Pokud je do optického vlákna vyslán obdélníkový impuls s výkonem P_0 a s šířkou Δt , pak se část výkonu se rozptýlí v místech fluktuace indexu lomu vlákna důsledkem Rayleigho rozptylu a vrátí se zpátky směrem k čelu. Následně lze ze vzdálenosti od čela vlákna vypočítat výkon $P(z)$, který je popsán následujícím vztahem [6]:

$$P(z) = \frac{1}{2} P_0 \Delta t S \alpha_R v_g e^{-2\alpha z}, \quad (3.1)$$

kde v_g znamená skupinovou rychlost šíření signálu, S reprezentuje koeficient pro zpětný rozptyl, α_r je příspěvek Rayleighova rozptylu na celkový útlum, symbol α je pro střední hodnotu koeficientu útlumu vlákna na délce (z) v dopředném a zpětném směru.

3.2 Distribuované optické systémy založeny na nelineárních jevech

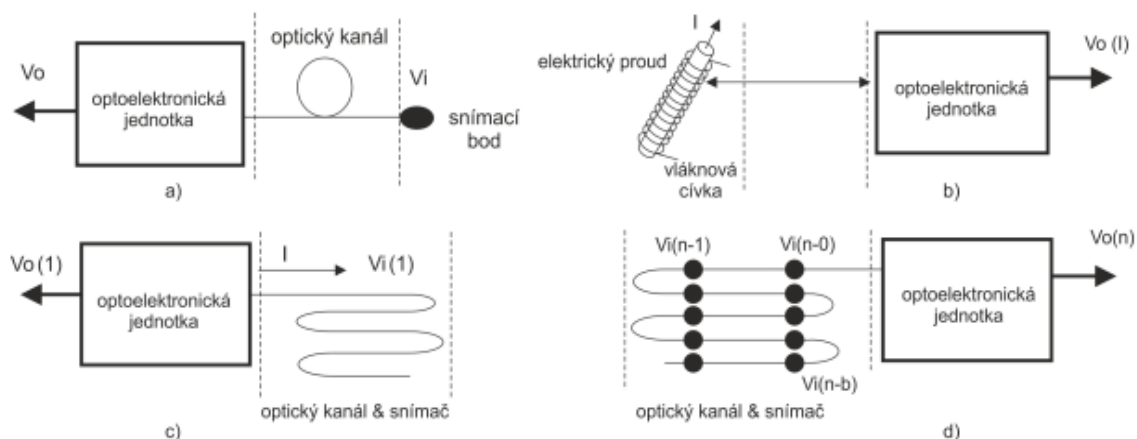
Distribuované optické senzory patří mezi vláknové optické senzory (dále jen zkráceně VOS). Moderní VOS vděčí za svůj vývoj dvěma důležitým vědeckým objevům. Těmito objevy jsou samozřejmě optické vlákno a laser. První experimenty za použití vlnovodu a laseru se datují počátkem 70. let 20. století, které jsou zrodem vývoje optovláknových senzorů. Optická vlákna byla vyvíjena především k telekomunikačním účelům, kde měla sloužit ke stabilnímu vysokorychlostnímu přenosu dat na velkou vzdálenost. Ovšem ukázalo se, že mohou být využity v rozmanitých odvětvích a oborech.

Z tohoto důvodu je v dnešní době na vlnovodech založena celá řada technologií - např. gyroskopy, hydrofony, nástroje v lékařství, osvětlení, měřicí přístroje atd.

Dnes existuje celá řada VOS a slouží k měření řadě fyzikálních veličin. VOS využívají ke své činnosti vnějších vlivů, které působí na vlákno. Těmito vlivy jsou například teplota, síla, vlhkost, záření, tlak různé plyny apod. Působením těchto vlivů na VOS způsobuje modulaci optického záření, která je následně vyhodnocena vhodným způsobem. Optický senzor je fotonický senzor, kde měřená veličina nebo vstupní signál přivádí do optického systému modifikaci nebo modulaci charakteristik světla. Signál je detekován, zpracován a upraven systémem (často v elektrické oblasti), následně je poskytnut výstupní signál, který je reprodukcí původní veličiny. Veličina, jež je měřena, může přenášenému či odraženému světlu modulovat amplitudovou, frekvenční, fázovou nebo polarizační charakteristiku.

Vláknové optické senzory se dají rozdělit podle několika kritérií. Mohou být rozděleny podle oboru použití a měřené veličiny (mechanické, teplotní, radiační, elektromagnetické, chemického složení, biomedicínské veličiny či toku a vířivosti kapalin), dle povahy přeměny převodu veličin (intrinšítní a extrinšítní senzory), podle modulace měřené veličiny (amplitudové nebo intenzitní senzory, fázové nebo interferometrické, spektroskopické a polarimetrické) dále podle výrobní technologie snímačů a převodníků (vláknová optická technologie, integrovaná optická technologie, integrovaná opto-elektronika a hybridní technologie). Posledním rozdělením je rozdělení podle prostorového rozložení měřené veličiny:

- Bodový senzor - tento typ VOS měří dané veličiny pouze v určitém místě. Je schopný být použit pro měření teploty, tlaku, zrychlení nebo chemických parametrů.
- Integrovaný senzor - u tohoto typu VOS je integrována měřená veličina ze všech naměřených hodnot. Tyto hodnoty následně tvoří pouze jednu výslednou hodnotu. Pomocí integrovaného VOS lze měřit například elektrický proud.
- Distribuovaný senzor - senzor, který je navržený tak, aby detekoval v prostoru. Je schopný tedy měřit veličinu podél celé délky vlákna. Více k tomuto typu senzoru v textu níže.
- Kvazi-distribuovaný senzor - založeno na principu, který leží na základě mezi bodovým a distribuovaným senzorem. Informace měřené veličiny je získávána v předem definovaných bodech podél délky vlákna. Jsou využívána speciální vlákna, která jsou citlivá na určitou látku nebo se přidávají materiály speciální, které bývají vkládány do optické smyčky, aby bylo možné snímat měřenou veličinu.



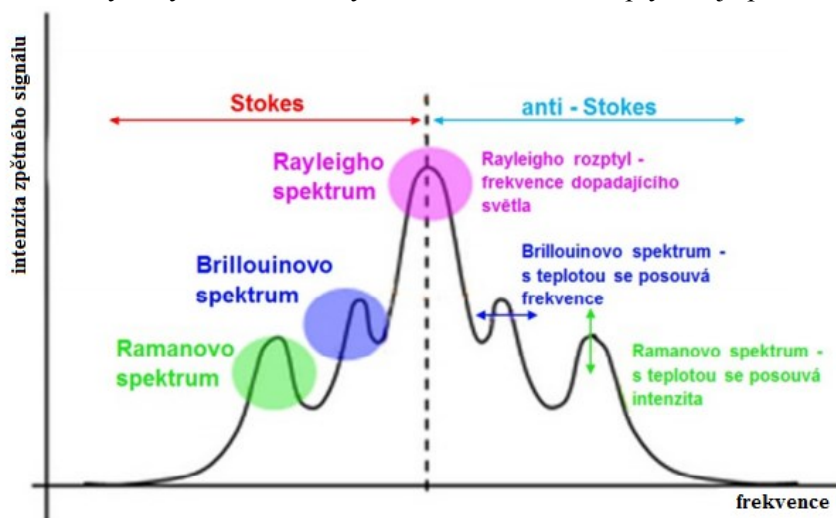
Obrázek 3.1: VOS rozděleny podle prostorového rozložení měřené veličiny [6]

Na obrázku 3.1, který je na předchozí straně, jsou zobrazeny vláknové optické senzory, které jsou rozděleny dle prostorového rozložení měřené veličiny. Bodový senzor (a), integrovaný senzor (b), distribuovaný senzor (c) a kvazi- distribuovaný senzor (d).

Distribuované senzorické systémy, jak již bylo zmíněno na předchozí straně, jsou schopny za pomoci optického vlákna detekovat měřenou veličinu kontinuálně podél celého vlákna. Optické vlákno si můžeme představit jako spoustu tisíc senzorů zapojených do série [6]. Distribuované systémy pracují obdobným způsobem, jako známé OTDR metry - také jsou založeny na principu optického reflektometru. Do optického vlákna je vyslán světelný impuls s vlnovou délkou 975 nm, 1064 nm nebo 1550 nm (v závislosti na konstrukci systému) a šířce 10 ns. Určitá část záření se vlivem rozptylu vrací zpět k detektoru [25]. Ovšem na rozdíl od OTDR se u distribuovaných systémů využívá nelineárních jevů v optickém vlákně. V případě nelineárních jevů v optickém vlákně se myslí Ramanův a Brillouinův nelineární rozptyl. V praxi proto existují dvě možné konstrukce distribuovaných systémů založených na nelineárních rozptylech. Prvním typem konstrukce je DSTS (Distributed Strain and Temperature Sensing) a druhým typem je DTS (Distributed Temperature Sensing) [27]. Použití DSTS resp. DTS přináší celou řadu výhod:

- Optická vlákna jsou odolná vůči elektromagnetickému záření.
- Bezpečné použití v nebezpečných prostředích (výbušných a hořlavých).
- Použitím speciálních typů kabelů, které jsou odolné vůči agresivnímu prostředí.
- Odečítání několika tisíc naměřených hodnot.
- Jednoduchá instalace a minimální údržba.
- Okamžitá změna teploty, pnutí, poruchy či jiných událostí.
- Délka optického vlákna, podél kterého probíhá měření, dosahuje až 10 km (DTS) nebo 30 km (DSTS).
- Schopnost dlouhodobého monitorování (do 30 let).
- Monitorování přenosových tras z hlediska teplotní stabilizace (snížení BER).
- Nízká hmotnost a malé rozměry vláken.
- Vysoká citlivost při měření.

Nevýhodou distribuovaných systémů založených na nelineárních rozptylech je pořizovací cena [25].



Obrázek 3.2: Spektrum rozptýleného záření [11]

Pro distribuované senzorické systémy, které ke své činnosti využívají stimulovaných nelineárních rozptylů (SBS nebo SRS) v optickém vlákně, je nejvíce důležitá anti-Stokesova část spektra. Anti-Stokesova část spektra mění velikost své intenzity na základě změn teploty podél délky optického vlákna v případě stimulovaného Ramanova rozptylu. U stimulovaného Brillouinova rozptylu se ovšem mění frekvence, a to na základě změn teploty či mechanického napětí podél optického vlákna. Systémy tedy principiálně pracují na základě změn intenzity či frekvence anti-Stokesovy části spektra (podle typu stimulovaného nelineárního rozptylu) oproti Stokesově části spektra. To lze vidět i na obrázku 3.2, který je na předchozí straně [11].

3.2.1 DSTS (Distributed Strain and Temperature Sensing)

Jak již plyne z anglického názvu, jedná se o tzv. distribuované snímání napětí (mechanické napětí neboli pnutí) a teploty podél optického vlákna. K fungování tohoto senzorického systému bývá využíván stimulovaný Brillouinův rozptyl, který je popsán v první kapitole této práce. K měření se využívá jednovidového optického vlákna (SM 9/125 μm). DSTS systémy jsou schopny měřit na vlákně do vzdálenosti 50 km. Prostorová rozlišitelnost DSTS systémů bývá standardně 0,5 m a teplotní rozlišitelnost bývá 0,05 $^{\circ}\text{C}$. Jsou to tedy velice precizní a přesné měřicí systémy.

Snímaná teplota podél vlákna může být odvozena z poměru Rayleighova rozptylu a Brillouinova rozptylu. Tento poměr je znám jako Landau-Placzek poměr [6]:

$$LPR = \frac{T_F}{T} (\beta_T \rho v_a^2 - 1). \quad (3.2)$$

LPR znamená Landau-Placzek ratio, T_F představuje fiktivní teplotu, β_T reprezentuje isotermickou stlačitelnost, ρ je hustota materiálu a v_a představuje akustickou rychlost. V praxi jsou typické hodnoty: $T_F = 1943 \text{ K}$, $\beta_T = 7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{N}^{-1}$, $\rho = 22500 \text{ Kg.m}^3$, $v_a = 5960 \text{ m.s}^{-1}$ při $LPR = 30$. Teplotní citlivost Brillouinova rozptylu je 0,3 % K^{-1} .

Brillouinův rozptyl je i citlivý na mechanické pnutí, které působí na optické vlákno. Byl proto zaveden vztah, který vyjadřuje vzájemnou závislost mezi teplotou a mechanickým napětím. Mechanické napětí může být získáno pomocí napěťo-mechanických odezev při známé teplotě, definovaných takto:

$$R(\varepsilon)_{T_d} = \frac{\xi(\varepsilon)_{T_D}}{1 - \xi(\varepsilon)_{T_D}}, \quad (3.3)$$

kde $\xi(\varepsilon)_{T_D}$ je Brillouin přenos pro určitou teplotu T_d kolísající jenom s mechanickým napětím ε na testovaném vlákně. Intenzita Brillouinova rozptylu odpovídá následujícímu vztahu:

$$I_{BS} \approx \frac{T}{\omega^2} \left| \int q_1 e^{i(\bar{k}_p - q_1)\bar{r}} + e^{i\gamma} q_2 e^{i(\bar{k}_p - q_2)\bar{r}} d\bar{r} \right|^2, \quad (3.4)$$

kde T je teplota, ω reprezentuje úhlovou akustickou rychlost, k_p značí vlnový vektor rozptýleného světla a γ je relativní fáze při změně směru módu pole [6].

3.2.2 DTS (Distributed Temperature Sensing)

Druhým typem je DTS systém, který jak již vyplývá z anglického názvu, slouží pro snímání teploty podél optického vlákna. K činnosti se opět využívá nelineárního rozptylu, nikoliv však opět stimulovaného Brillouinova rozptylu jak bylo u DSTS systému, ale využívá se stimulovaný Ramanův rozptyl. Stimulovaný Ramanův rozptyl je stručně popsán v první kapitole. Opět je potřeba optického

vlákna a u tohoto systému se využívá multimódové vlákno (MM 50/125 μm nebo lze také použít 62,5/125 μm). DTS systémy jsou schopny měřit na vláknech do vzdálenosti 8 - 10 km. Prostorová rozlišitelnost DTS systémů bývá standardně 1 m a teplotní rozlišitelnost bývá 0,01°C.

K vyhodnocení teplotní změny se využívá následující vztah [6]:

$$I_{RS} = \frac{P_{AS}}{P_S} = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp \left(- \frac{h\Delta\nu_{vib}}{kT} \right), \quad (3.5)$$

kde P_{AS} a P_S jsou výkony anti-Stokesovy a Stokesovy části Ramanova spektra shodující se s vlnovými délkami λ_{AS} a λ_S . ν_{vib} představuje vibrační frekvence, která dosahuje v reálných podmínkách hodnoty 11,9 THz, symbol k reprezentuje Boltzmannovu frekvenci, T značí teplotu a symbol h reprezentuje Planckovu konstantu [6].

4 Praktická část

V praktické části diplomové práce bylo úkolem změřit pomocí distribuovaného napětového (mechanické napětí) a teplotního systému Brillouinovské frekvence pro různé typy optických vláken v závislosti na teplotě. Následně měly změřené teplotní závislosti být vyhodnoceny, a také měly být stanoveny empirické relace popisující tuto závislost.

Cílem praktické části bylo zjistit, jakým způsobem se chovají Brillouinovské frekvence v závislosti na teplotě. Při měření byla využita standardní telekomunikační optická vlákna, a tak dalším cílem práce také bylo zjistit, zda je vhodné tato vlákna využít k senzorickým účelům. Samozřejmě na trhu již existují speciální vlákna určená k senzorickým účelům, ovšem cena těchto speciálních vláken mnohonásobně převyšuje ceny standardních telekomunikačních vláken.

Praktická část obsahuje celkem 5 podkapitol. V první podkapitole je stručně popsán použitý měřicí přístroj. Následuje podkapitola, ve které je popsána příprava optických vláken na měření (tato podkapitola se skládá z dalších dvou podřazených podkapitol). Ve třetí podkapitole je zobrazeno schéma měření, a také ukázka měřicího pracoviště. Za touto podkapitolou následuje kalibrace měřicího přístroje. Po této podkapitole následuje podkapitola pátá, tedy poslední, ve které je uveden seznam použitých optických vláken a naměřené výsledky, včetně jejich grafických zpracování. Pátá podkapitola je složena celkem z šesti podřazených podkapitol, kde v prvních pěti jsou zobrazeny naměřené výsledky pro všech pět použitých vláken a v šesté jsou uvedeny naměřené výsledky z měření, které bylo provedeno s odlišným způsobem uchycení.

4.1 Použitý měřicí přístroj

K měření Brillouinovských frekvencí pro různé typy optických vláken v závislosti na teplotě byl použit měřicí přístroj DITEST STA-R (výrobce Omnisens).

DITEST STA-R je velmi výkonný opto-vláknový distribuovaný systém, který je určený k analyzování tlakového a teplotního namáhání optických vláken. Tento DSTS systém je založen na Brillouinově rozptylu světla. Parametry přístroje jsou následující:

- Počet kanálů: 2 nezávislé kanály s možností rozšíření až na 20 externích kanálů s použitím externího přepínače.
- Typ vlákna: standardní jednomódové vlákno.
- Vzdálenost: až do 50 km.
- Prostorové rozlišení (odlišné): 1 m u 20 km, 2 m u 30 km a 3 m u 50 km.
- Počet bodů: 100 000.
- Měřené parametry: Brillouinův frekvenční posuv, napětí, Brillouinova šířka a zisk.
- Teplotní rozlišení: 0,1 °C (rozsah od -273 °C do 700 °C)
- Rozlišení tlakového napětí: 2 με.
- Čas měření: typicky 1 až 2 minuty, u vyšších rozlišení vzorků 5 až 10 minut [28].

Bylo samozřejmě využito více přístrojů a nástrojů, například ke svaření optických vláken s pigtaily byly využity stripovací kleště, zalamovačka optických vláken, svařovačka optických vláken (typ Fujikura FSM-45PM) atd. Bližší popis těchto přístrojů a nástrojů není nutné v této práci uvádět. Ukázka měřicího přístroje DITEST STA-R je zobrazena na následujícím obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: *DITEST STA-R – ilustrační ukázka* [28]

4.2 Příprava vláken na měření

Před samotným měření Brillouinových frekvencí různých optických vláken v závislosti na teplotě bylo potřeba si připravit vlákna na měření. V této části jsou popsány postupy příprav optických vláken. Měření vláken probíhalo dvojího způsobu. První způsob byl, kdy vlákna byla pomocí lepidel uchycena. Druhý způsob byl, kdy vlákna byla neuchycena (tzn. volná). V kapitole 4.2.1 je popsán postup přípravy uchyceného vlákna a v kapitole 4.2.2 je popsán postup přípravy neuchyceného vlákna.

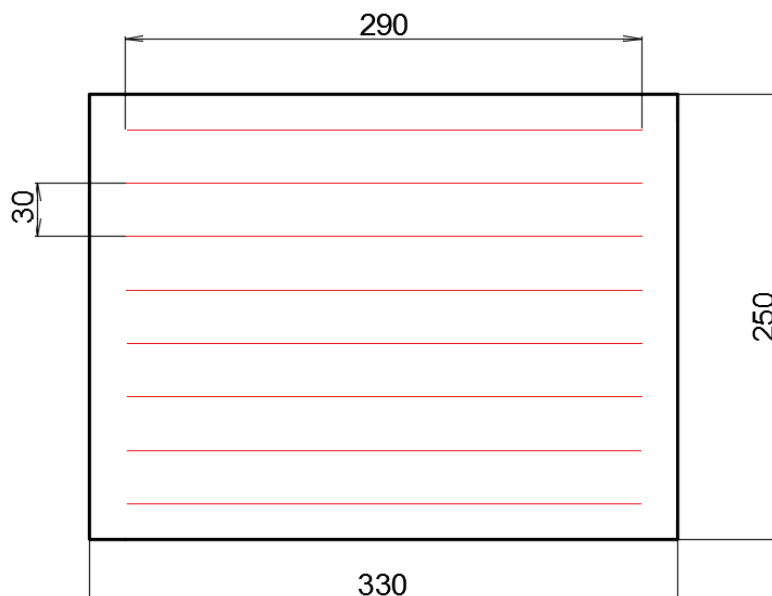
4.2.1 Uchycené vlákno

Uchycení optického vlákna bylo provedeno k pozinkovanému plechu (tloušťka 0,55 mm) obdélníkového tvaru o rozměrech 330 a 250 mm. Plech byl následně umístěn do teplotní komory, kde byla postupně zvyšována teplota. Do teplotní komory by plech s většími rozměry nebylo možné vložit, a proto byl použit plech s výše uvedenými rozměry. Postup uchycení optického vlákna k plechu byl složen ze čtyř kroků:

- První krok: rozkreslení čar.
- Druhý krok: nanesení podkladových vrstev na plech.
- Třetí krok: roztažení vlákna na podkladové vrstvy.
- Čtvrtý krok: nanesení krycích vrstev.

Jednotlivé kroky uchycení optického vlákna jsou blíže popsány a obrázky znázorněny na následujících stranách. U všech čtyř kroků je zobrazen okótovaný náčrtek (rozměry se mohly ve skutečnosti mírně lišit). Rozměry u jednotlivých okótovaných náčrtků jsou vždy uvedeny v milimetrech. Dále u druhého a čtvrtého kroku (tj. nanesení podkladových a krycích vrstev) jsou pro ukázkou zobrazeny i fotografie z realizace.

Nejdříve byly lihovým fixem rozkresleny čáry na zakoupený plech, který byl na míru nastříhán. Důvod rozkreslení těchto čar, byl kvůli přehlednosti a preciznosti přípravy uchycení vlákna. Rozkreslení čar je zobrazeno na obrázku 4.2, jež je zobrazen na následující straně.

Obrázek 4.2: *Nákres plechu a rozkreslených čar*

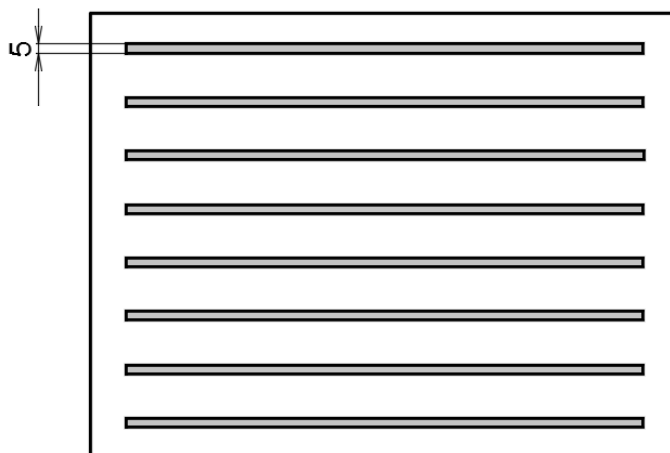
Z obrázku je patrné, že na obdélníkový plech o rozměrech 250 mm a 330 mm bylo předkresleno 8 čar o délce 290 mm. Jednotlivé čáry byly od sebe vzdáleny 30 mm. Na takto rozkreslené čáry byly následně nanášeny první vrstvy uchycení - podkladové vrstvy.

K nanesení podkladových a i krycích vrstev byly využity dva fixační materiály - dvě lepidla, a to Hřebíky a šrouby v tubě a Mamut Glue (obě lepidla od výrobce Den Braven). Použitá lepidla jsou zobrazena na obrázku 4.3. Výběr těchto materiálu vycházel z bakalářské práce „Vliv uchycení optických vláken na měření pomocí DSTS systému“ (autor Bc. Stanislav Lovecký, rok 2014).

Obrázek 4.3: *Ukázka použitých lepidel*

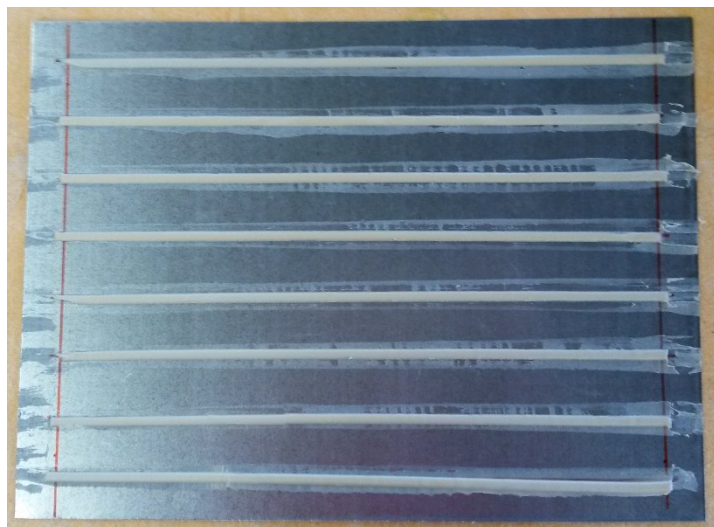
Nanášení podkladových vrstev lepidlem probíhalo následovně: nejdříve bylo lepidlo rovnoměrně vytlačeno pomocí výtlačné pistole z kartuše na rozkreslené čáry. Následně takto nanesené lepidlo bylo stáhnuto podél vodící lišty (ta sloužila ke stabilitě a přesnosti) připravenou špachtlí, ve které byl vypilován obdélníkový tvar s výškou 1,2 mm a šířkou 5 mm. Špachtle tedy sloužila jako stěrka.

Rozměry podkladové vrstvy tedy byly přibližně 1,2 mm na výšku a 5 mm na šířku. Náčrsek plechu s nanesenými podkladovými vrstvami je vidět na obrázku 4.4. Ukázka stěrky pro podkladové vrstvy je zobrazena na obrázku 4.6.

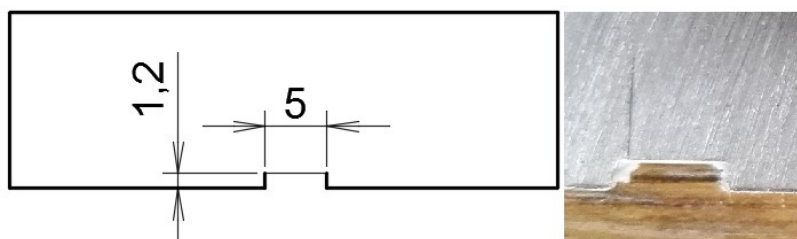


Obrázek 4.4: *Náčrsek plechu s podkladovými vrstvami*

Ukázka výše popsaným způsobem nanášení podkladových vrstev je vidět na následujícím obrázku 4.5. Jelikož se jednalo o ruční nanášení v domácích podmínkách, tak podkladové vrstvy nebyly precizní (strojově by to samozřejmě bylo možné udělat lépe). Každopádně takto nanesené podkladové vrstvy lepidla byly k uchycení vlákna postačující.



Obrázek 4.5: *Ukázka nanesených podkladových vrstev*



Obrázek 4.6: *Ukázka použité stěrky pro podkladové vrstvy*

Po nanesení podkladových vrstev bylo nezbytně nutné nechat lepidlo minimálně 24 hodin vytvrdit. Po vytvrzení lepidla následoval třetí krok uchycení vlákna k plechu, a to roztažení vlákna na již vytvrzené podkladové vrstvy. Vlákno bylo na podkladové vrstvy roztáhnuto následovně (viz obrázek 4.7; pozn.: pro lepší vysvětlení byly jednotlivé podklady očíslovány): vlákno vstupuje z pravé strany na podklad 1. Dále pokračuje na podklad 5. Z podkladu 5 jde dále na podklad 2, z podkladu 2 na podklad 6, z podkladu 6 na podklad 3, z podkladu 3 na podklad 7, z podkladu 7 na podklad 4, z podkladu 4 na podklad 8 a z podkladu 8 již vlákno vystupuje. Přeskokování tras bylo z důvodu vyhnutí se větším ohybům, které by mohly nastat, pokud by vlákno šlo z podkladu 1 na podklad 2.



Obrázek 4.7: Nákres plechu s podkladovými vrstvami a připraveným vláknem k uchycení

Na takto připravené vlákno byla posléze nanесena další vrstva lepidla – tzv. krycí vrstva. Postup nanесení krycích vrstev byl obdobný nanесení vrstev podkladových. Opět nejdříve bylo vytlačeno pistolí lepidlo z kartuše. Tentokrát nikoliv na plech, jak tomu bylo v případě podkladových vrstev, ale na připravené vlákno, které bylo nataženo na podkladových vrstvách. Vytlačené lepidlo na vlákne bylo opět stáhnuto podél vodící lišty, tentokrát však zakoupeným přípravkem (stěrkou) trojúhelníkového tvaru. Rozměry této stěrky byly 5 mm na výšku a 9 mm na šířku. Nákres plechu s nanесenými krycími vrstvami je vidět na obrázku 4.8. Ukázka stěrky pro krycí vrstvy je zobrazen na obrázku 4.10, jež je na následující straně.



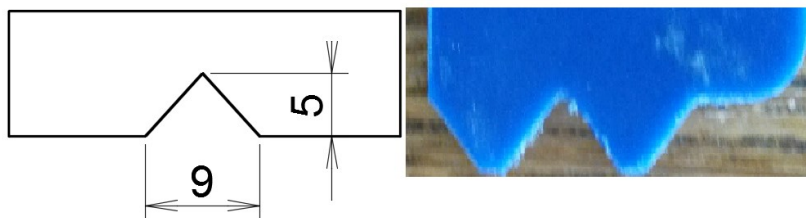
Obrázek 4.8: Nákres plechu s krycími vrstvami

Ukázka výše popsáním způsobem nanášení krycích vrstev je zobrazena na obrázku 4.9. Jelikož se opět jednalo o ruční nanášení v domácích podmínkách, tak i krycí vrstvy nebyly dokonalé. Každopádně i takto nanesené krycí vrstvy lepidlem byly k uchycení vlákna postačující. Po nanesení krycích vrstev bylo opět potřeba počkat minimálně 24 hodin na vytvrzení lepidla.

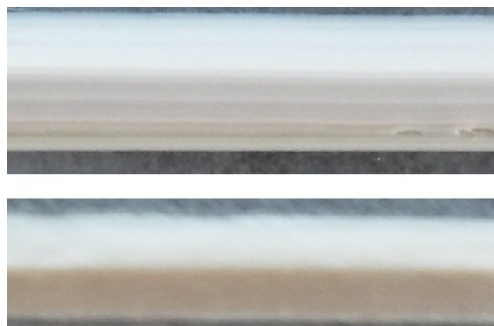


Obrázek 4.9: Ukázka nanesených krycích vrstev

Na obrázku 4.9 jsou na krajích plechu vidět kousky lepicí pásky. Tyto kousky pásky byly aplikovány během třetího kroku uchycení, tj. při rozmístění optického vlákna na podkladové vrstvy. Kousky lepicí pásky byly použity, aby vlákno během rozmístění bylo natažené a nesklouzávalo z podkladových vrstev.



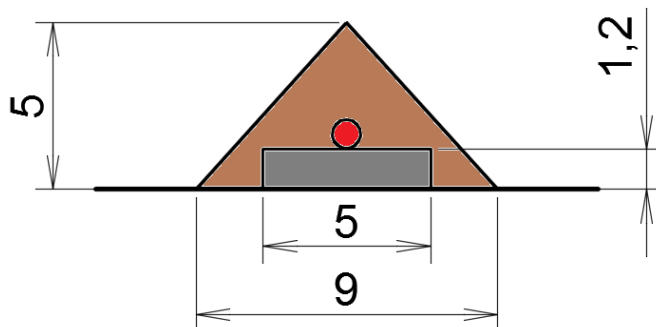
Obrázek 4.10: Ukázka použité stěrky pro krycí vrstvy



Obrázek 4.11: Ukázka detailů krycích vrstev

Na obrázku 4.11, který je na předchozí straně, jsou zobrazeny detaily krycích vrstev. V horní části obrázku je zobrazena krycí vrstva lepidlem Mamut Glue a v dolní části obrázku je zobrazena krycí vrstva lepidlem Hřebíky a šrouby v tubě.

Na následujícím obrázku 4.12 je zobrazen náčrtek řezu uchyceného optického vlákna. Šedou barvou je zobrazena podkladová vrstva, červenou barvou je zobrazeno optické vlákno a hnědou barvou je zobrazena krycí vrstva. Průměr optického vlákna byl 900 resp. 250 μm (900 μm u vlákna se sekundární ochranou a 250 μm u vlákna s primární ochranou). V náčrtu je zobrazeno optické vlákno o průměru 900 μm . Tímto způsobem byla uchycena veškerá použitá vlákna.

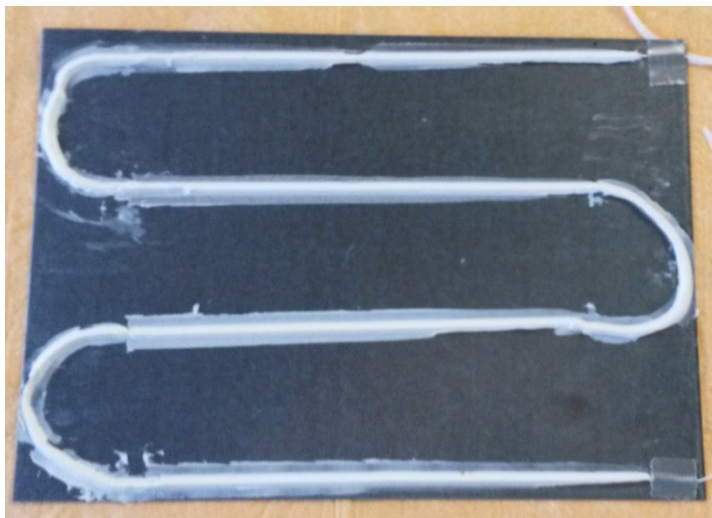


Obrázek 4.12: Náčrtek řezu uchyceného vlákna

Byl také spočítán objem lepidla použitý na jedné dráze (délka přibližně 290 mm). Na jednom plechu bylo 8 drah. Objem lepidla na uchycení jedné dráhy u vlákna o průměru 900 μm je přibližně 6341 mm^3 a objem lepidla na uchycení jedné dráhy u vlákna o průměru 250 μm je přibližně 6511 mm^3 .

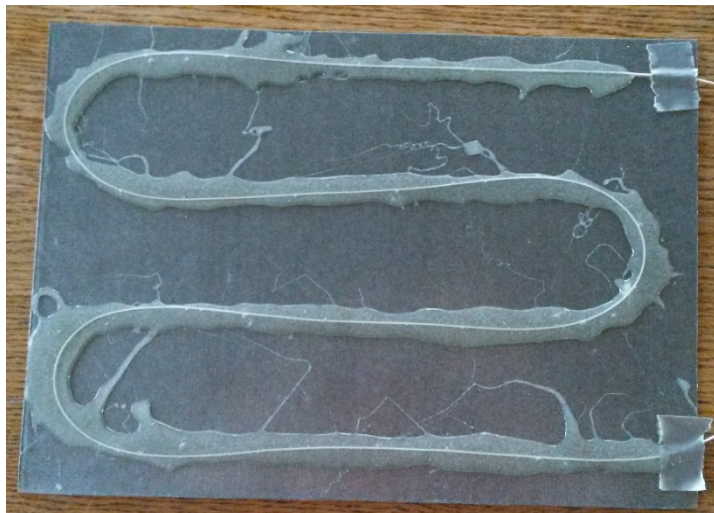
Uchycení vlákna lepidly samozřejmě vycházelo z několika předchozích znalostí a testování. Bylo vyzkoušeno a zjištěno, že příliš velká vrstva lepidla (nad 1 cm) může vést až k tomu, že měření nebude možné provést. Z tohoto důvodu byly vlákna uchycovány jen malými podkladovými a krycími vrstvami (viz postup uchycení na předchozích stranách).

Původně bylo zamýšleno uchycení vlákna, které je zobrazeno na obrázku 4.13. Tento způsob uchycení vláken se ovšem ukázal jako nevhodný, protože byla uchycena jen malá délka vlákna. U uchycení, které bylo při práci použito, byla uchycena téměř dvojnásobná délka vlákna oproti původnímu návrhu.



Obrázek 4.13: Původní návrh uchycení vlákna

Bylo také zamýšleno použít třetí materiál k uchycení - Epoxidovou pryskyřici 1200 (výrobce Kittfort). Jak lze vidět na obrázku 4.14, tak pryskyřice, jež se nanáší v tekutém stavu, se během tvrzení roztekla a neudržela tvar. Nebyla zatím nalezena vhodná technologie nanesení tohoto materiálu a z tohoto důvodu se uchycení tímto materiálem vyloučilo.



Obrázek 4.14: *Uchycení epoxidovou pryskyřicí 1200*

4.2.2 Neuchycené (volné) vlákno

Příprava neuchyceného vlákna byla oproti přípravě uchyceného vlákna daleko jednodušší. V podstatě se jednalo o omotání vlákna okolo lepicí pásky, která měla průměr přibližně 11,5 cm. Tato lepicí páska se nadále nevyužívala, aby její průměr zůstal stejný. Pokaždé se provedl stejný počet otoček (14), aby byla délka jednotlivých vláken přibližně stejná (5 metrů). Následně vlákno bylo z lepicí pásky sejmuto, a aby zůstal tvar stejný, tak bylo i slepeno tenkými pruhy lepicí pásky. To lze vidět i na obrázku 4.15, kde v levé části obrázku je zobrazeno omotané vlákno okolo lepicí pásky a v pravé části obrázku je zobrazen hotový smotek.

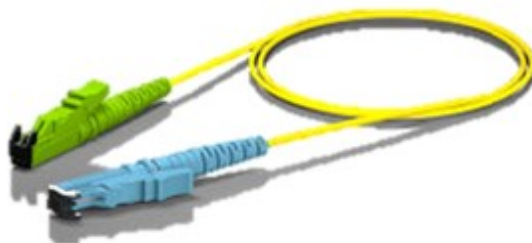


Obrázek 4.15: *Omotané vlákno kolem lepicí pásky (vlevo) a přichystaný smotek (vpravo)*

Důvod přípravy těchto smotků byl jednoduchý – bylo to z důvodu nutnosti mít v teplotní komoře, ale i mimo teplotní komoru určitou část vlákna (přibližně 5 metrů). Nejdříve bylo připraveno vlákno uchycené a posléze následovala příprava dvou smotků. První smotek byl umístěn mimo teplotní komoru a sloužil k rozlišení naměřených hodnot vlákna uchyceného a vlákna neuchyceného (smotek druhý). Schéma měření, na němž je vidět využití smotků, je uvedeno v následující kapitole.

4.3 Schéma měření a ukázka měřícího pracoviště

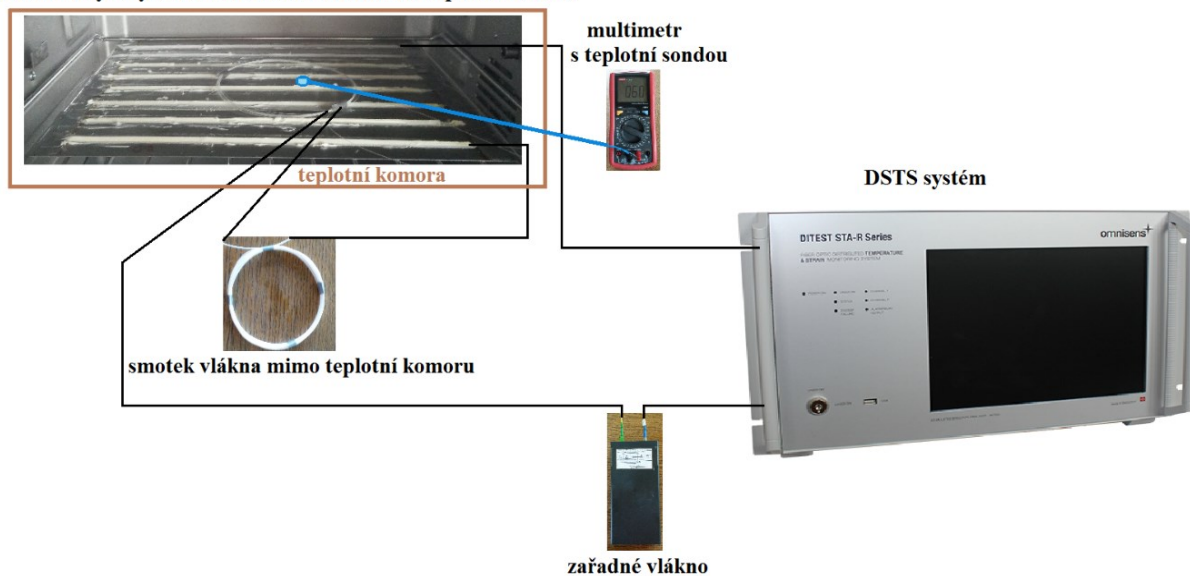
Výše popsáním způsobem připravené vlákna k měření byla následně svařena s pigtaily E2000/APC E9/125/900 (výrobce Diamond). Tyto pigtaily byly potřebné ke spojení vláken s měřicím přístrojem. Ukázkový obrázek pigtailu je zobrazen na obrázku 4.16.



Obrázek 4.16: Pigtail E2000/APC E9/125/900 – ilustrační obrázek [29]

Na následujícím obrázku 4.17 je zobrazeno, jakým způsobem probíhalo měření. Z obrázku je patrné, že bylo využito zařadné vlákno na konci trasy. Na obrázku je také vidět, že v teplotní komoře (typ Concept ET-5050) byl umístěn plech s uchyceným vláknem. Na tomto plechu byl následně umístěn smotek vlákna. Teplotní komora běžela na funkci, kdy bylo zapnuto horní i spodní těleso spolu s ventilátorem a bylo zajištěno rovnoměrné rozložení teplého vzduchu. Teplota v teplotní komoře byla kontrolována pomocí multimetru (typ UNI-T UT 70A) s připojenou teplotní sondou.

plech s uchyceným vláknem a smotek vlákna v teplotní komoře



Obrázek 4.17: Schéma zapojení

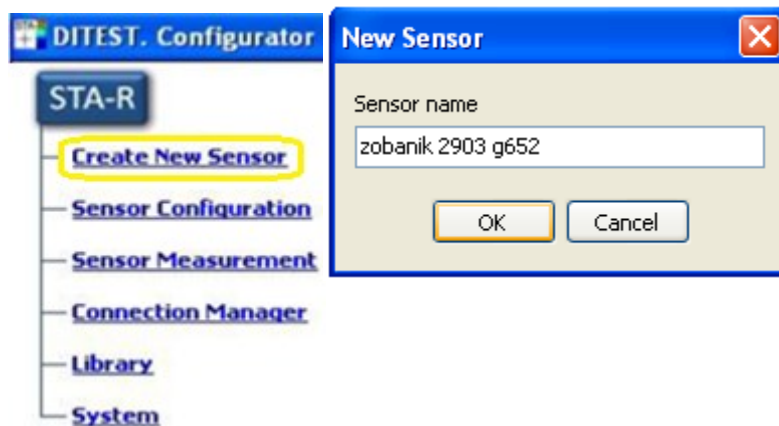
Na obrázku 4.18 (následující strana) je také zobrazena fotografie teplotní komory a multimetru. Tato fotografie byla pořízená během měření. V teplotní komoře byla postupně nastavována teplota od 30 °C do 80 °C, s krokem 10 °C.



Obrázek 4.18: Ukázka měřicího pracoviště (teplotní komora a multimetru)

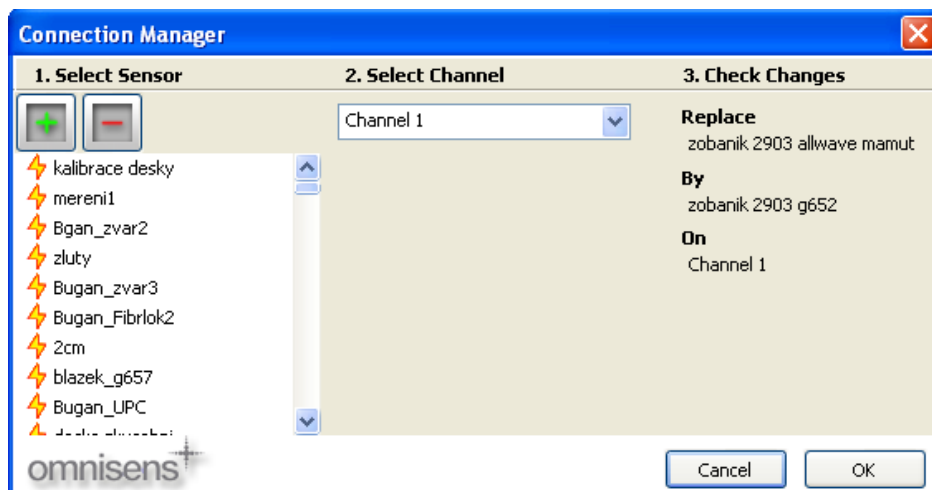
4.4 Kalibrace přístroje

V této části je popsána kalibrace měřicího přístroje. Kalibraci bylo nutné provést vždy před začátkem nového měření. Prvním krokem kalibrace je vytvoření nového senzoru. To se provede v záložce STA-R pomocí nabídky Create New Sensor. Následně je třeba nový senzor pojmenovat (viz obrázek 4.19.).



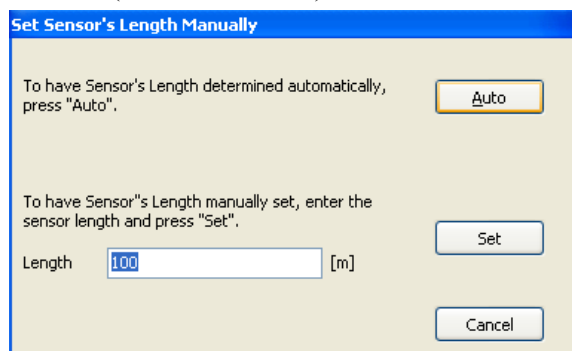
Obrázek 4.19: Tvoření nového senzoru

Dalším krokem kalibrace přístroje je výběr kanálu. Přístroj má k dispozici 2 kanály (Channel 1 a Channel 2). Tento krok lze vidět na následujícím obrázku 4.20. Během kalibrace byl vybrán první kanál – Channel 1.



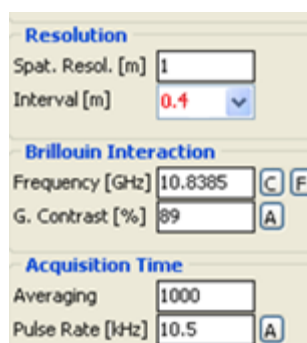
Obrázek 4.20: Výběr kanálu

Následuje krok, kdy se přístroj táže na délku senzoru. Délku senzoru lze zadat ručně tlačítkem Set, anebo automaticky tlačítkem Auto (viz obrázek 4.21).



Obrázek 4.21: Volba délky senzoru

Před spuštění kalibrace je možné nastavit také interval měření. Je na výběr z mnoha možností: 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 1; 2; 2,5; 4; 5; 10; 20; 25; 40; 50 a 100 metrů. Jedná se o určený krok, se kterým bude přístroj měřit. Samozřejmě čím menší interval, tím déle měření trvá. Pro měření byl zvolen interval s délkou 0,4 metrů (tento interval je k měření dostačující). Ukázka výběru intervalu je vidět na následujícím obrázku 4.22.



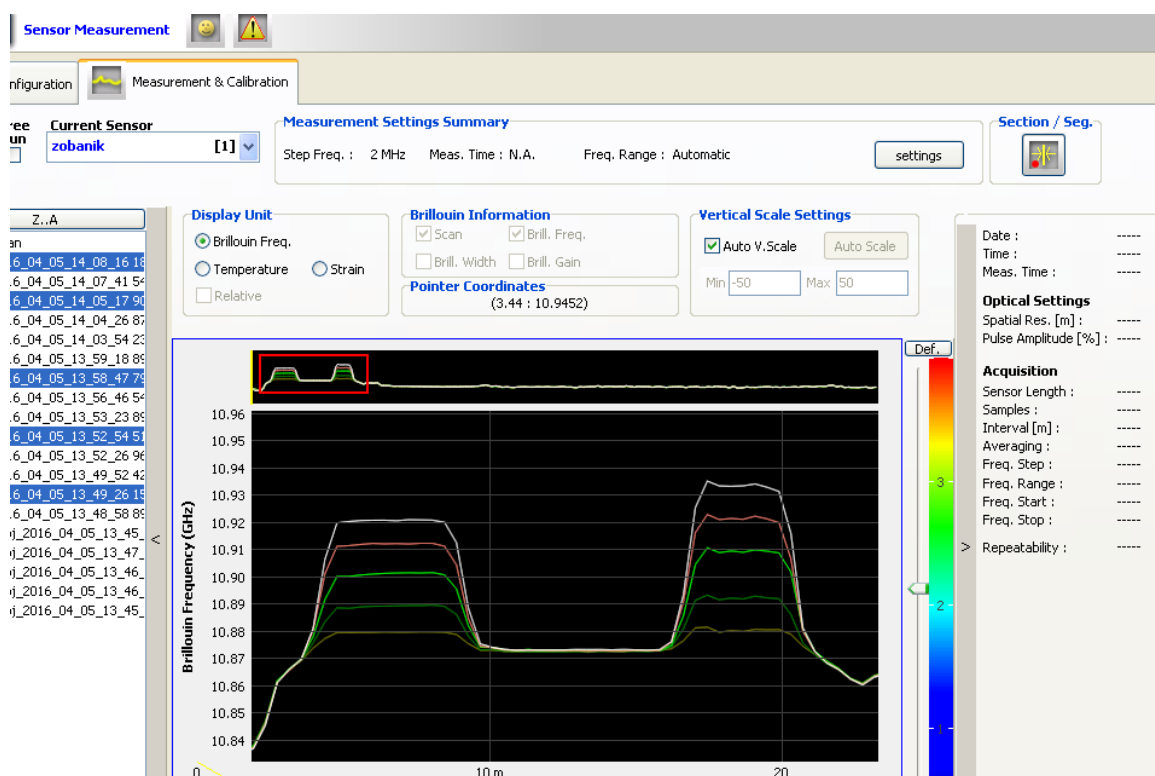
Obrázek 4.22: Výběr intervalu měření

Kalibrace trvala pár minut. Poté již bylo možné přistoupit k samotnému měření. To se provedlo pomocí nabídky Sensor Measurement (viz obrázek 4.23).



Obrázek 4.23: Spuštění měření

Na následujícím obrázku 4.24 je zobrazena ukázka průběhu měření. Na obrázku lze vidět, že už během měření měřicí přístroj dovoluje náhled na naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí. Náhled na tyto naměřené hodnoty se provede velmi jednoduše – v levém sloupci se označí již proběhlé náměry, které chceme mít zobrazené a ty se následně zobrazí. Při měření lze také využít funkci „Set Baseline“, která vytvoří z určeného náměru (zvolí si uživatel) nulový bod, od kterého se následně budou zobrazovat pouze rozdíly Brillouinovských frekvencí vůči zvolenému nulovému bodu. Při měření lze využít i funkci „Free Run“, kdy se po skončení jednoho měření automaticky spustí měření nové.



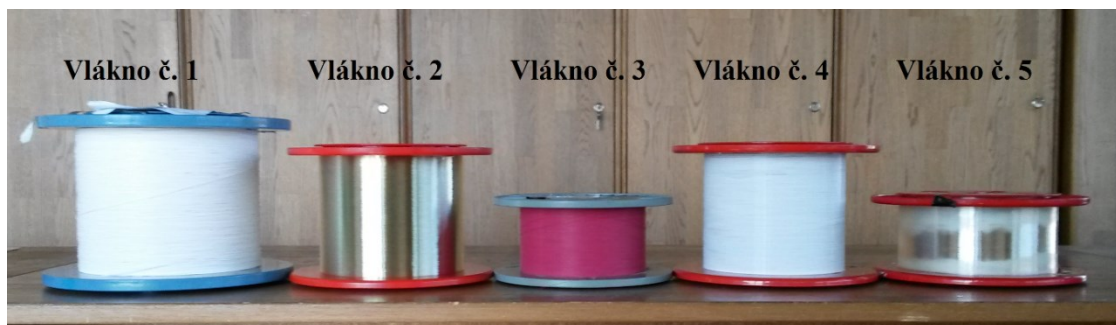
Obrázek 4.24: Ukázka průběhu měření

4.5 Použitá vlákna a naměřené výsledky

V této kapitole jsou nejdříve uvedena použita optická vlákna. Dále v této kapitole jsou již zobrazeny naměřené výsledky. V tabulce 4.1 je uveden seznam optických vláken, které byly při měření použity. Bylo proměřeno pět různých telekomunikačních vláken. Všech pět vláken bylo od stejného výrobce – OFS. Vlákno 1 mělo průměr 900 μm , zbylé čtyři vlákna měla průměr 250 μm . Vlákna jsou také zobrazena na obrázku 4.25.

Tabulka 4.1: *Seznam použitých optických vláken*

Označení vlákna v DP	Název či označení vlákna na špulce
Vlákno č. 1	G.652.D se sekundární ochranou
Vlákno č. 2	AllWave+ (G.657A1, G.652D)
Vlákno č. 3	ID: 004J54651C2RCB
Vlákno č. 4	Sériové číslo: 516220
Vlákno č. 5	Označení na špulce: 7-932-050-002

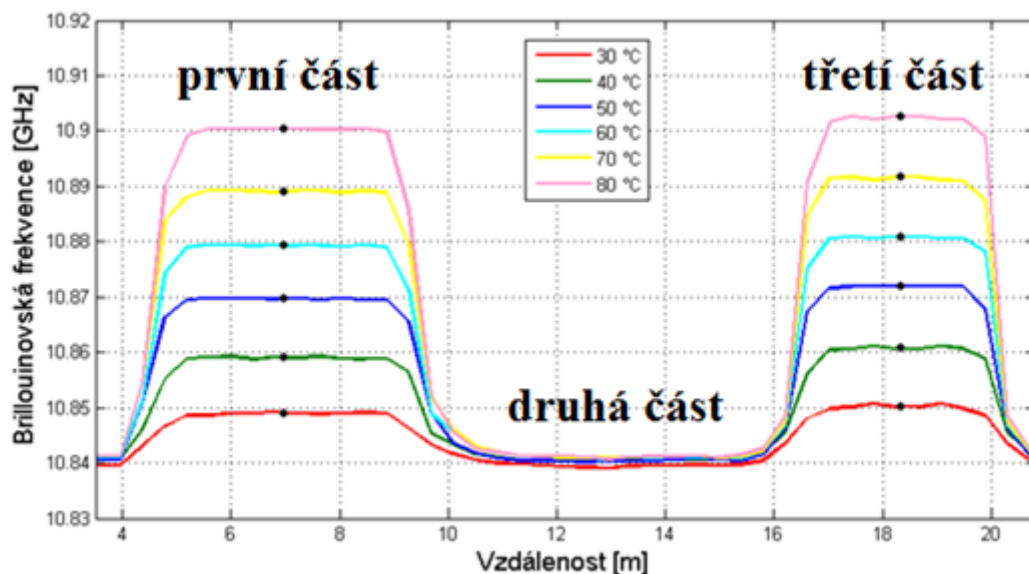


Obrázek 4.25: *Ukázka použitých optických vláken*

Všechna měření byla vždy provedena 10x. Opakování měření bylo z důvodu věrohodnosti naměřených výsledků. Následně bylo těchto 10 měření zprůměrováno do jednoho výsledného.

Na obrázku 4.26, který je zobrazen na následující straně, je ukázka naměřených hodnot získaných z měřicího přístroje. Tento graf odpovídá naměřeným hodnotám prvního vlákna. Graf je složen celkem ze tří částí. V teplotní komoře byly umístěna jen první a třetí část vlákna. První část zobrazuje vlákno, které bylo volné (smotek); druhá část zobrazuje vlákno, které bylo mimo teplotní komoru (druhý smotek; tato část sloužila k rozeznání částí vlákna volného a vlákna uchyceného) a třetí část grafu zobrazuje vlákno, které bylo uchycené (v tomto případě uchycení pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě). Z první a třetí částí (tedy částí, které nás zajímají) byla vybrána vždy jedna hodnota pro každou teplotu, což lze vidět i na zobrazeném obrázku (černé body). Tyto hodnoty byly následně vyneseny do grafu závislosti Brillouinovských frekvencí na teplotě (u každého vlákna první graf).

Pro každé optické vlákno jsou uvedeny dvě grafické zobrazení naměřených hodnot. Oba grafy zobrazují závislost Brillouinovských frekvencí na teplotě. U obou grafů byla využita polynomická regrese 3. řádu. Samozřejmě je možné využít i vyšší, a tedy i přesnější řád polynomické regrese, ovšem pro tento případ je to zbytečné a navíc je vyšší řád matematicky náročnější. Polynomická regrese představuje aproximaci naměřených hodnot. Důležitým parametrem polynomické regrese je hodnota spolehlivosti R^2 . Tato hodnota nabývá hodnot od 0 do 1 (včetně). Čím více se hodnota spolehlivosti blíží 1, tím je vykreslená regresní křivka spolehlivější a proložení hodnot je kvalitnější.



Obrázek 4.26: Ukázka naměřených hodnot

První graf u každého měřeného optického vlákna zobrazuje 3 křivky. Každé z pěti měřených vláken bylo totiž měřeno třemi způsoby – neuchyceně, uchyceně pomocí lepidla Mamut Glue a uchyceně pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě. Kvůli přehlednosti a porovnání jednotlivých způsobů uchycení jsou tudíž všechny tři křivky v jednom grafu.

Druhý graf u každého vlákna zobrazuje 2 křivky. Tento graf zobrazuje, jaký vliv měly použité lepidla na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí. V grafu jsou zobrazeny rozdíly mezi naměřenými hodnotami Brillouinových frekvencí vlákna uchyceného pomocí lepidla Mamut Glue a vlákna neuchyceného, a také rozdíly mezi naměřenými hodnotami Brillouinových frekvencí vlákna uchyceného pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě a vlákna neuchyceného. Jelikož rozdíly hodnot Brillouinových frekvencí mezi jednotlivými způsoby uchycení byly v jednotkách až desítkách MHz, tak na rozdíl od prvního grafu jsou u druhého grafu Brillouinové frekvence uvedeny v MHz. Druhý graf v podstatě detailněji zobrazuje rozdíly, které lze vidět i v prvním grafu a z toho důvodu druhé grafy nebudou blíže popisovány. Popisky budou uvedeny pouze vždy u prvních grafů všech pěti měřených optických vláken.

U každého z pěti měřených vláken jsou také zobrazeny 3 tabulky. První tabulka vždy zobrazuje naměřené hodnoty, jež byly získány výše popsáním způsobem. Další tabulka zobrazuje rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro první graf. Třetí a zároveň poslední tabulka zobrazuje rovněž rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 . V tomto případě ovšem pro druhý graf. Tabulky s rovnicemi polynomických regresí představují empirické relace, které byly třetím bodem zadání této práce.

U každého vlákna byly také vypočítány teplotní koeficienty. Teplotní koeficienty udávají, jaká změna Brillouinové frekvence v průměru odpovídá na změnu jednoho °C. Teplotní koeficienty byly samozřejmě vypočítány pro všechny 3 způsoby měření (vlákno neuchycené, vlákno uchycené pomocí lepidla Mamut Glue a vlákno uchycené pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě).

Tabulky s naměřenými hodnotami Brillouinových frekvencí a vypočítanými teplotními koeficienty u všech pěti vláken jsou k porovnání zobrazeny v příloze. Z důvodu rozsahu bude v textu u popisu jednotlivých grafů využívána zkratka BF, která představuje Brillouinovou frekvenci.

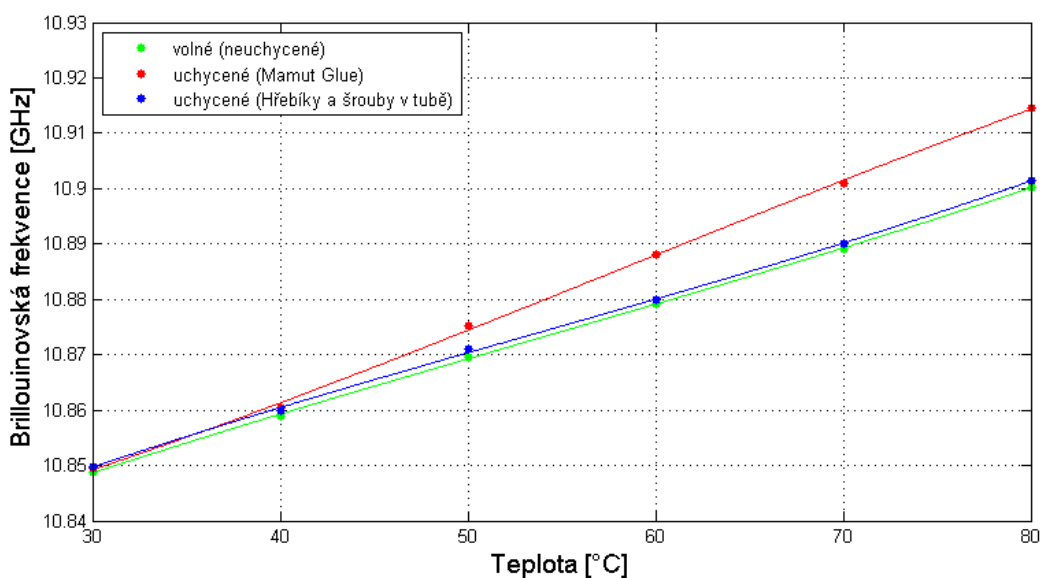
4.5.1 Vlákno č. 1

V následující tabulce 4.2 jsou zobrazeny naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí všech tří měřených způsobů uchycení prvního vlákna.

Tabulka 4.2: Naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí

teplota [°C]	Brillouinovská frekvence [GHz]		
	neuchycené	Mamut Glue	Hřebíky a šrouby v tubě
30	10,84876	10,84975	10,84958
40	10,85895	10,86042	10,85992
50	10,86956	10,87528	10,87073
60	10,87918	10,88804	10,88038
70	10,88908	10,90101	10,89047
80	10,90023	10,91450	10,90185

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf (obrázek 4.27), ze kterého lze vidět, jakým způsobem se chovaly Brillouinovské frekvence (dále jen BF) s rostoucí teplotou u jednotlivého uchycení. Neuchycené vlákno mělo BF 10,84876 GHz při 30 °C. Hodnota BF poté s teplotou přibližně lineárně rostla až do hodnoty 10,90023 GHz při 80 °C. BF u vlákna uchyceného pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě se chovaly obdobně jako BF vlákna neuchyceného. Také rostly přibližně lineárně, ovšem s tím rozdílem, že BF byly posunuté na trochu vyšší hodnoty (rozdíl rostl s teplotou), a také sklon křivky popisující závislost BF na teplotě byl mírně strmější. Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 0,82 MHz a při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 1,62 MHz. BF u vlákna uchyceného pomocí lepidla Mamut Glue se chovaly oproti vláknu neuchycenému odlišně – BF byly posunuty na vyšší hodnoty (rozdíl s teplotou postupně rostl). U tohoto způsobu uchycení byl sklon křivky, jež popisuje závislost BF na teplotě, mnohem strmější (to odpovídá mnohem větší citlivosti na teplotě). Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 0,99 MHz. Rozdíl se ovšem zvyšoval mnohem více, než tomu bylo u lepidla Hřebíky a šrouby v tubě. Při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 14,28 MHz.



Obrázek 4.27: Závislost Brillouinovské frekvence na teplotě

V následující tabulce 4.3 jsou zobrazeny rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximacím na obrázku 4.27.

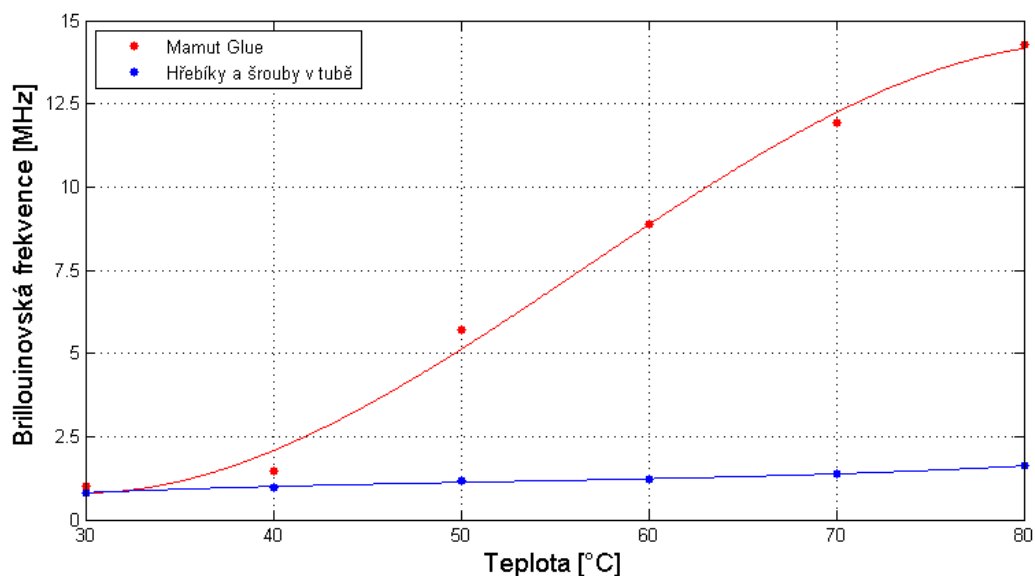
Tabulka 4.3: *Rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.27*

Způsob uchycení	Rovnice polynomické regrese	R^2
neuchycené	$y = 7E-08x^3 - 1E-05x^2 + 0,0016x + 10,809$	0,9999
Mamut Glue	$y = -1E-07x^3 + 2E-05x^2 + 0,0003x + 10,827$	0,9993
Hřebíky a šrouby v tubě	$y = 8E-08x^3 - 1E-05x^2 + 0,0017x + 10,808$	0,9998

Z naměřených hodnot Brillouinovských frekvencí byly také vypočítány teplotní koeficienty:

- U neuchyceného vlákna 1,02926 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Mamut Glue 1,29508 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Hřebíky a šrouby v tubě 1,04526 MHz / °C.

Na následujícím obrázku 4.28 je zobrazen graf, jež zobrazuje, jaký vliv měla použitá lepidla na naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí. V tabulce 4.4 jsou následně zobrazeny rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximaci na obrázku 4.28.



Obrázek 4.28: *Vliv lepidel na naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí*

Tabulka 4.4: *Rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.28*

Způsob uchycení	Rovnice polynomické regrese	R^2
Mamut Glue	$y = -0,0002x^3 + 0,0304x^2 - 1,3357x + 18,392$	0,9942
Hřebíky a šrouby v tubě	$y = 9E-06x^3 - 0,0014x^2 + 0,0826x - 0,6669$	0,9895

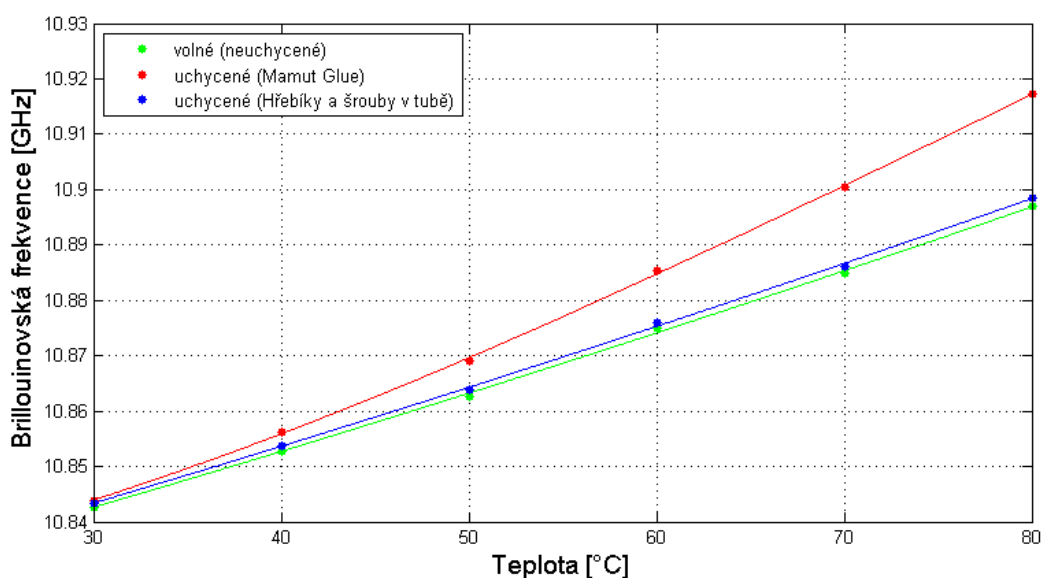
4.5.2 Vlákno č. 2

V následující tabulce 4.5 jsou zobrazeny naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí všech tří měřených způsobů uchycení druhého vlákna.

Tabulka 4.5: Naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí

teplota [°C]	Brillouinovská frekvence [GHz]		
	neuchycené	Mamut Glue	Hřebíky a šrouby v tubě
30	10,84264	10,84390	10,84339
40	10,85285	10,85612	10,85376
50	10,86272	10,86912	10,86380
60	10,87488	10,88530	10,87606
70	10,88485	10,90040	10,88617
80	10,89700	10,91724	10,89852

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf (obrázek 4.29), ze kterého lze vidět, jakým způsobem se chovaly Brillouinovské frekvence s rostoucí teplotou u jednotlivého uchycení. Neuchycené vlákno mělo BF 10,84264 GHz při 30 °C. Hodnota BF poté s teplotou přibližně lineárně rostla až do hodnoty 10,89700 GHz při 80 °C. BF u vlákna uchyceného pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě se chovaly obdobně jako BF vlákna neuchyceného. Také rostly přibližně lineárně, ovšem s tím rozdílem, že BF byly posunuté na trochu vyšší hodnoty (rozdíl rostl s teplotou), a také sklon křivky popisující závislost BF na teplotě byl mírně strmější. Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 0,75 MHz a při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 1,52 MHz. BF u vlákna uchyceného pomocí lepidla Mamut Glue se chovaly oproti vláknu neuchycenému odlišně – BF byly posunuty na vyšší hodnoty (rozdíl s teplotou postupně rostl). U tohoto způsobu uchycení byl sklon křivky, jež popisuje závislost BF na teplotě, mnohem strmější (to odpovídá mnohem větší citlivosti na teplotě). Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 1,26 MHz. Rozdíl se ovšem zvyšoval mnohem více, než tomu bylo u lepidla Hřebíky a šrouby v tubě. Při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 20,24 MHz.



Obrázek 4.29: Závislost Brillouinovské frekvence na teplotě

V následující tabulce 4.6 jsou zobrazeny rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximacím na obrázku 4.29.

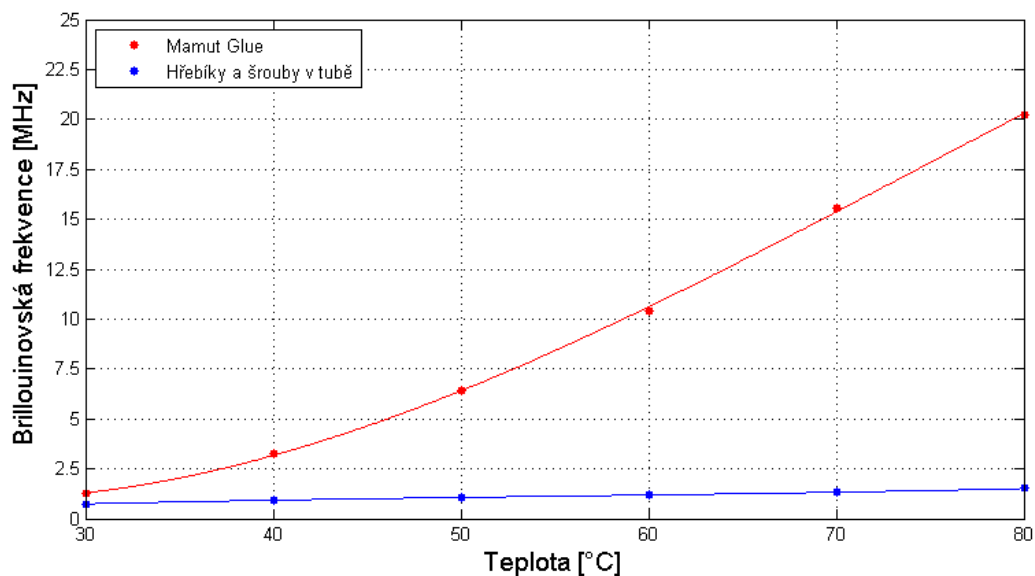
Tabulka 4.6: *Rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.29*

Způsob uchycení	Rovnice polynomické regrese	R^2
neuchycené	$y = -8E-09x^3 + 3E-06x^2 + 0,0008x + 10,815$	0,9995
Mamut Glue	$y = -7E-08x^3 + 2E-05x^2 + 0,0002x + 10,823$	0,9998
Hřebíky a šrouby v tubě	$y = -2E-09x^3 + 2E-06x^2 + 0,0009x + 10,815$	0,9995

Z naměřených hodnot Brillouinovských frekvencí byly také vypočítány teplotní koeficienty:

- U neuchyceného vlákna 1,08725 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Mamut Glue 1,46678 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Hřebíky a šrouby v tubě 1,10265 MHz / °C.

Na následujícím obrázku 4.30 je zobrazen graf, jež zobrazuje, jaký vliv měla použitá lepidla na naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí. V tabulce 4.7 jsou následně zobrazeny rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximaci na obrázku 4.30.



Obrázek 4.30: *Vliv lepidel na naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí*

Tabulka 4.7: *Rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.30*

Způsob uchycení	Rovnice polynomické regrese	R^2
Mamut Glue	$y = -7E-05x^3 + 0,0148x^2 - 0,6009x + 7,8285$	0,9997
Hřebíky a šrouby v tubě	$y = 5E-06x^3 - 0,0009x^2 + 0,0596x - 0,4052$	0,9979

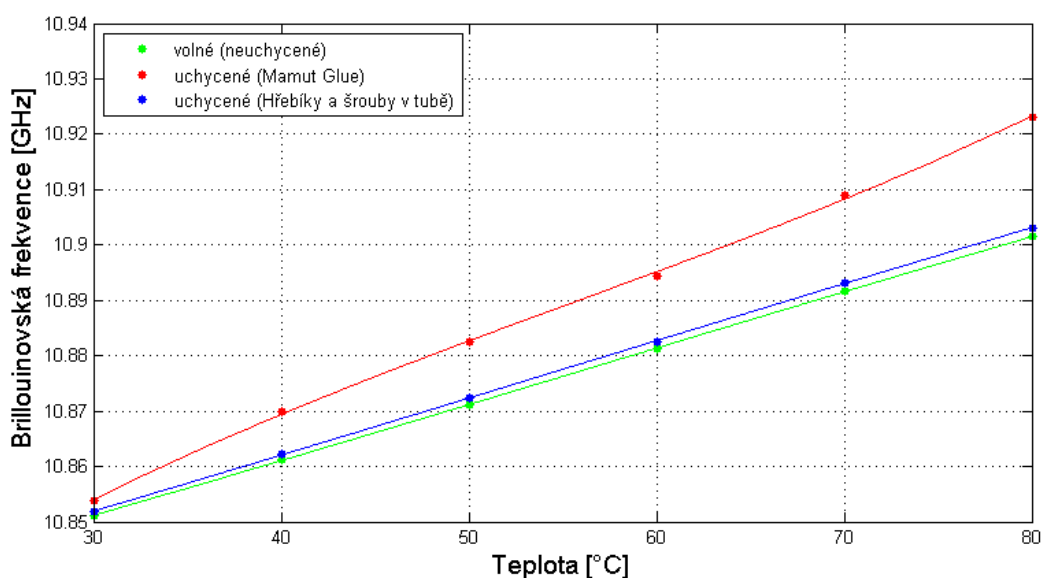
4.5.3 Vlákno č. 3

V následující tabulce 4.8 jsou zobrazeny naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí všech tří měřených způsobů uchycení třetího vlákna.

Tabulka 4.8: Naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí

teplota [°C]	Brillouinovská frekvence [GHz]		
	neuchycené	Mamut Glue	Hřebíky a šrouby v tubě
30	10,85114	10,85378	10,85190
40	10,86117	10,86986	10,86216
50	10,87115	10,88256	10,87235
60	10,88117	10,89443	10,88253
70	10,89175	10,90903	10,89321
80	10,90145	10,92308	10,90307

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf (obrázek 4.31), ze kterého lze vidět, jakým způsobem se chovaly Brillouinovské frekvence s rostoucí teplotou u jednotlivého uchycení. Neuchycené vlákno mělo BF 10,85114 GHz při 30 °C. Hodnota BF poté s teplotou přibližně lineárně rostla až do hodnoty 10,90145 GHz při 80 °C. BF u vlákna uchyceného pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě se chovaly obdobně jako BF vlákna neuchyceného. Také rostly přibližně lineárně, ovšem s tím rozdílem, že BF byly posunuté na trochu vyšší hodnoty (rozdíl rostl s teplotou), a také sklon křivky popisující závislost BF na teplotě byl mírně strmější. Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 0,77 MHz a při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 1,63 MHz. BF u vlákna uchyceného pomocí lepidla Mamut Glue se chovaly oproti vláknu neuchycenému odlišně – BF byly posunuty na vyšší hodnoty (rozdíl s teplotou postupně rostl). U tohoto způsobu uchycení byl sklon křivky, jež popisuje závislost BF na teplotě, mnohem strmější (to odpovídá mnohem větší citlivosti na teplotě). Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 2,64 MHz. Rozdíl se ovšem zvyšoval mnohem více, než tomu bylo u lepidla Hřebíky a šrouby v tubě. Při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 21,64 MHz.



Obrázek 4.31: Závislost Brillouinovské frekvence na teplotě

V následující tabulce 4.9 jsou zobrazeny rovnice polynommických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximacím na obrázku 4.31.

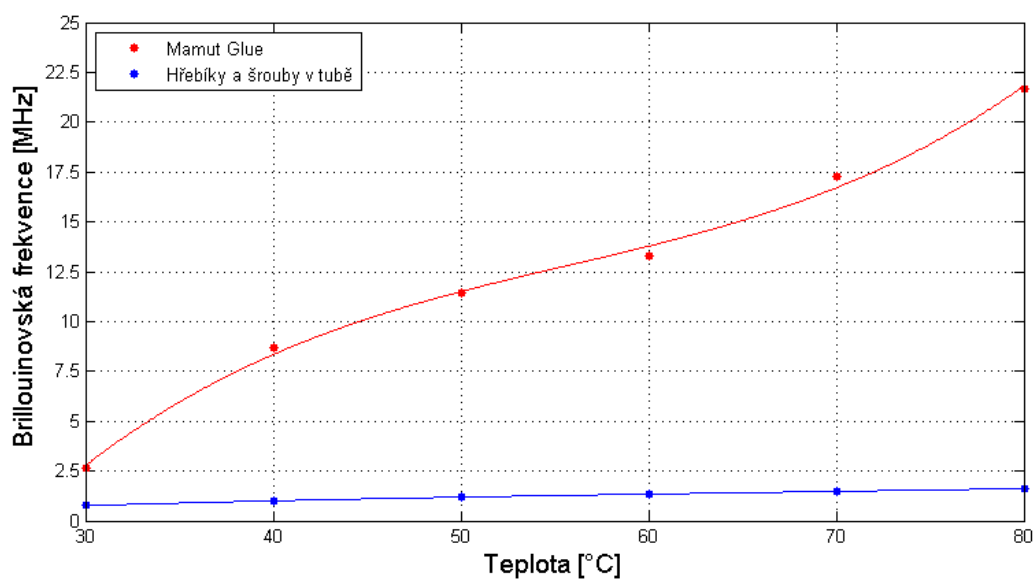
Tabulka 4.9: *Rovnice polynommických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.31*

Způsob uchycení	Rovnice polynommické regrese	R^2
neuchycené	$y = -2E-08x^3 + 4E-06x^2 + 0,0008x + 10,825$	0,9999
Mamut Glue	$y = 2E-07x^3 - 4E-05x^2 + 0,0034x + 10,781$	0,9996
Hřebíky a šrouby v tubě	$y = -2E-08x^3 + 3E-06x^2 + 0,0008x + 10,824$	1,0000

Z naměřených hodnot Brillouinových frekvencí byly také vypočítány teplotní koeficienty:

- U neuchyceného vlákna 1,00620 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Mamut Glue 1,38619 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Hřebíky a šrouby v tubě 1,02340 MHz / °C.

Na následujícím obrázku 4.32 je zobrazen graf, jež zobrazuje, jaký vliv měla použitá lepidla na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí. V tabulce 4.10 jsou následně zobrazeny rovnice polynommických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximaci na obrázku 4.32.



Obrázek 4.32: *Vliv lepidel na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí*

Tabulka 4.10: *Rovnice polynommických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.32*

Způsob uchycení	Rovnice polynommické regrese	R^2
Mamut Glue	$y = 0,0003x^3 - 0,0427x^2 + 2,6019x - 43,749$	0,9965
Hřebíky a šrouby v tubě	$y = 4E-06x^3 - 0,0007x^2 + 0,0613x - 0,5315$	0,9978

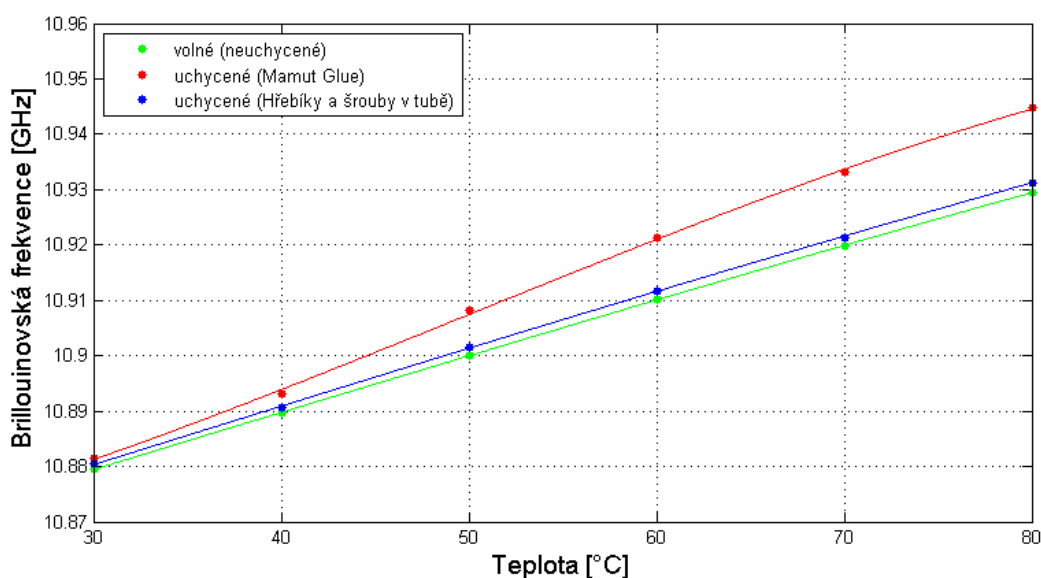
4.5.4 Vlákno č. 4

V následující tabulce 4.11 jsou zobrazeny naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí všech tří měřených způsobů uchycení čtvrtého vlákna.

Tabulka 4.11: Naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí

teplota [°C]	Brillouinovská frekvence [GHz]		
	neuchycené	Mamut Glue	Hřebíky a šrouby v tubě
30	10,87952	10,88150	10,88039
40	10,88956	10,89306	10,89069
50	10,90013	10,90811	10,90149
60	10,91019	10,92124	10,91175
70	10,91974	10,93308	10,92141
80	10,92953	10,94475	10,93131

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf (obrázek 4.33), ze kterého lze vidět, jakým způsobem se chovaly Brillouinovské frekvence s rostoucí teplotou u jednotlivého uchycení. Neuchycené vlákno mělo BF 10,87952 GHz při 30 °C. Hodnota BF poté s teplotou přibližně lineárně rostla až do hodnoty 10,92953 GHz při 80 °C. BF u vlákna uchyceného pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě se chovaly obdobně jako BF vlákna neuchyceného. Také rostly přibližně lineárně, ovšem s tím rozdílem, že BF byly posunuté na trochu vyšší hodnoty (rozdíl rostl s teplotou), a také sklon křivky popisující závislost BF na teplotě byl mírně strmější. Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 0,87 MHz a při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 1,78 MHz. BF u vlákna uchyceného pomocí lepidla Mamut Glue se chovaly oproti vláknu neuchycenému odlišně – BF byly posunuty na vyšší hodnoty (rozdíl s teplotou postupně rostl). U tohoto způsobu uchycení byl sklon křivky, jež popisuje závislost BF na teplotě mnohem, strmější (to odpovídá mnohem větší citlivosti na teplotě). Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 1,97 MHz. Rozdíl se ovšem zvyšoval mnohem více, než tomu bylo u lepidla Hřebíky a šrouby v tubě. Při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 15,22 MHz.



Obrázek 4.33: Závislost Brillouinovské frekvence na teplotě

V následující tabulce 4.12 jsou zobrazeny rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximacím na obrázku 4.33.

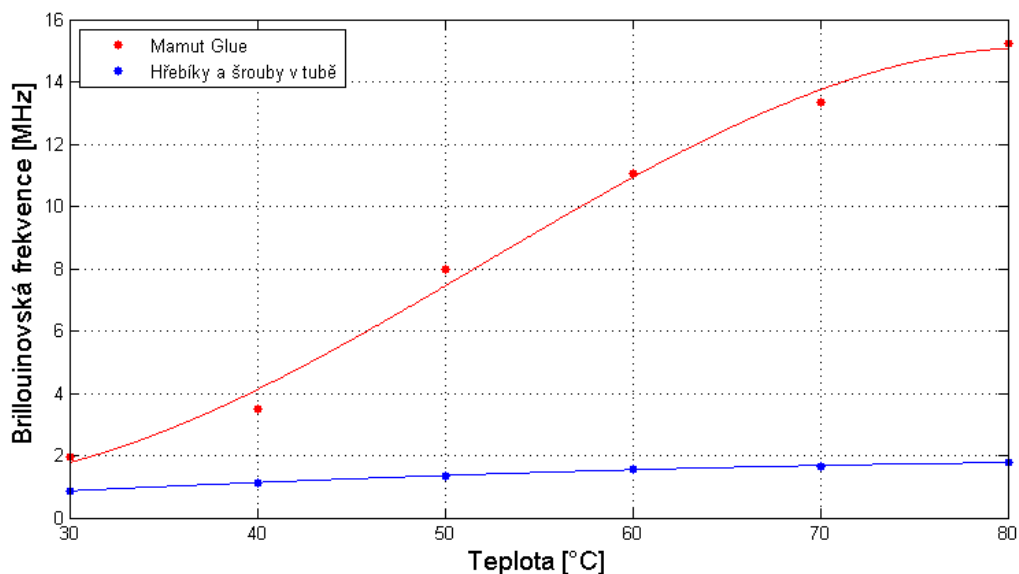
Tabulka 4.12: *Rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.33*

Způsob uchycení	Rovnice polynomické regrese	R^2
neuchycené	$y = -1\text{E-}08x^3 + 1\text{E-}06x^2 + 0,001x + 10,849$	0,9999
Mamut Glue	$y = -2\text{E-}07x^3 + 2\text{E-}05x^2 + 0,0002x + 10,858$	0,9994
Hřebíky a šrouby v tubě	$y = -1\text{E-}08x^3 + 1\text{E-}06x^2 + 0,001x + 10,849$	0,9999

Z naměřených hodnot Brillouinových frekvencí byly také vypočítány teplotní koeficienty:

- U neuchyceného vlákna 1,00011 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Mamut Glue 1,26510 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Hřebíky a šrouby v tubě 1,01830 MHz / °C.

Na následujícím obrázku 4.34 je zobrazen graf, jež zobrazuje, jaký vliv měla použitá lepidla na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí. V tabulce 4.13 jsou následně zobrazeny rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximaci na obrázku 4.34.



Obrázek 4.34: *Vliv lepidel na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí*

Tabulka 4.13: *Rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.34*

Způsob uchycení	Rovnice polynomické regrese	R^2
Mamut Glue	$y = -0,0001x^3 + 0,0214x^2 - 0,7586x + 8,9595$	0,9990
Hřebíky a šrouby v tubě	$y = -2\text{E-}07x^3 - 0,0002x^2 + 0,0408x - 0,1818$	0,9936

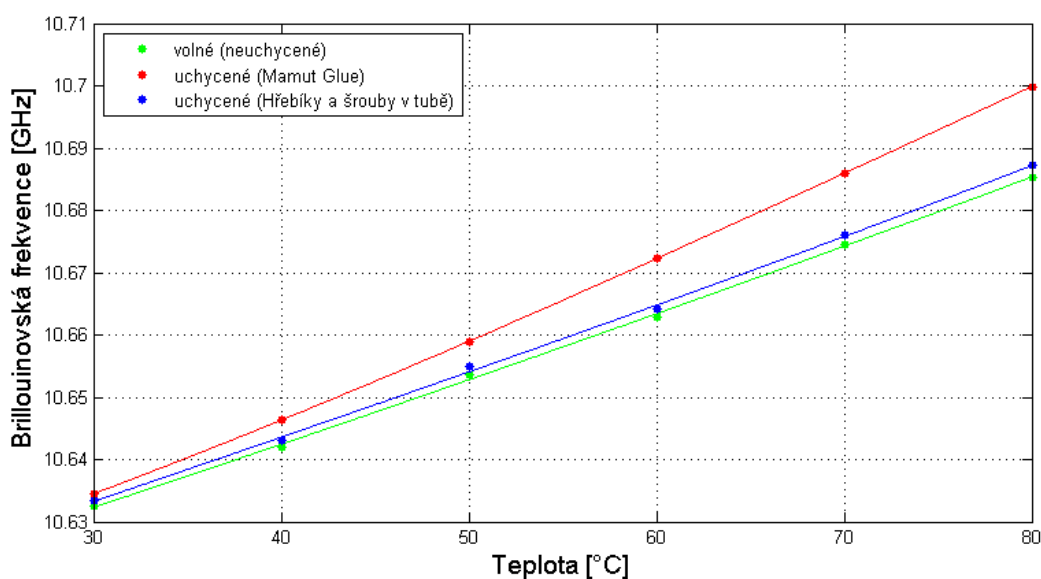
4.5.5 Vlákno č. 5

V následující tabulce 4.14 jsou zobrazeny naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí všech tří měřených způsobů uchycení pátého vlákna.

Tabulka 4.14: Naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí

teplota [°C]	Brillouinovská frekvence [GHz]		
	neuchycené	Mamut Glue	Hřebíky a šrouby v tubě
30	10,63245	10,63447	10,63340
40	10,64191	10,64642	10,64303
50	10,65363	10,65884	10,65492
60	10,66281	10,67233	10,66419
70	10,67444	10,68595	10,67596
80	10,68535	10,69986	10,68718

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf (obrázek 4.35), ze kterého lze vidět, jakým způsobem se chovaly Brillouinovské frekvence s rostoucí teplotou u jednotlivého uchycení. Neuchycené vlákno mělo BF 10,63245 GHz při 30 °C. Hodnota BF poté s teplotou přibližně lineárně rostla až do hodnoty 10,68535 GHz při 80 °C. BF u vlákna uchyceného pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě se chovaly obdobně jako BF vlákna neuchyceného. Také rostly přibližně lineárně, ovšem s tím rozdílem, že BF byly posunuté na trochu vyšší hodnoty (rozdíl rostl s teplotou), a také sklon křivky popisující závislost BF na teplotě byl mírně strmější. Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 0,95 MHz a při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 1,83 MHz. BF u vlákna uchyceného pomocí lepidla Mamut Glue se chovaly oproti vláknu neuchycenému odlišně – BF byly posunuty na vyšší hodnoty (rozdíl s teplotou postupně rostl). U tohoto způsobu uchycení byl sklon křivky, jež popisuje závislost BF na teplotě mnohem, strmější (to odpovídá mnohem větší citlivosti na teplotě). Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 2,02 MHz. Rozdíl se ovšem zvyšoval mnohem více, než tomu bylo u lepidla Hřebíky a šrouby v tubě. Při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 14,52 MHz.



Obrázek 4.35: Závislost Brillouinovské frekvence na teplotě

V následující tabulce 4.15 jsou zobrazeny rovnice polynomičských regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximacím na obrázku 4.35.

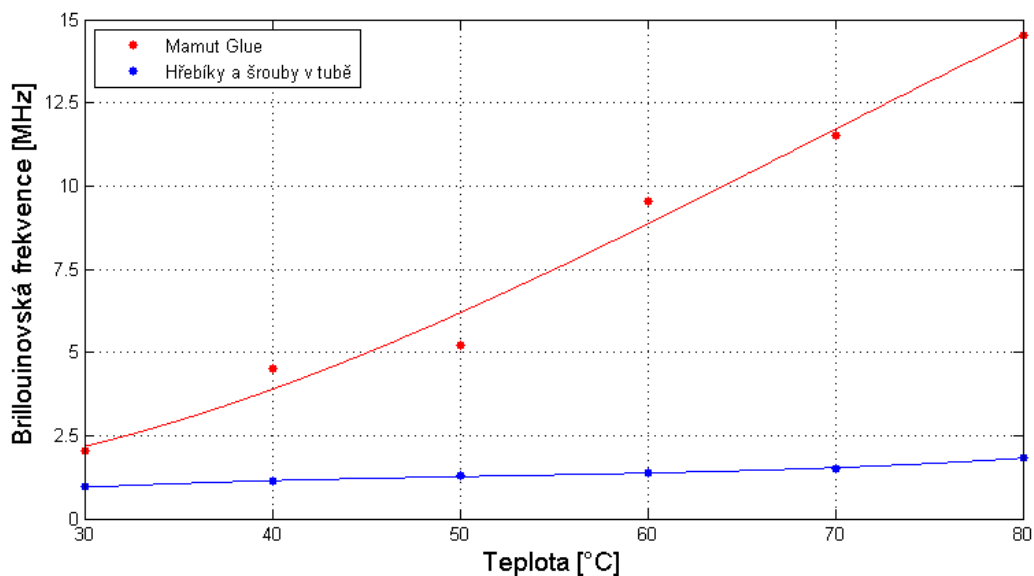
Tabulka 4.15: *Rovnice polynomičských regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.35*

Způsob uchycení	Rovnice polynomičské regrese	R^2
neuchycené	$y = 4E-10x^3 + 1E-06x^2 + 0,0009x + 10,603$	0,9993
Mamut Glue	$y = -3E-08x^3 + 8E-06x^2 + 0,0007x + 10,606$	1,0000
Hřebíky a šrouby v tubě	$y = 1E-08x^3 - 6E-07x^2 + 0,001x + 10,603$	0,9993

Z naměřených hodnot Brillouinových frekvencí byly také vypočítány teplotní koeficienty:

- U neuchyceného vlákna 1,05797 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Mamut Glue 1,30786 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Hřebíky a šrouby v tubě 1,07557 MHz / °C.

Na následujícím obrázku 4.36 je zobrazen graf, jež zobrazuje, jaký vliv měla použitá lepidla na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí. V tabulce 4.16 jsou následně zobrazeny rovnice polynomičských regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximaci na obrázku 4.36.



Obrázek 4.36: *Vliv lepidel na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí*

Tabulka 4.16: *Rovnice polynomičských regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.36*

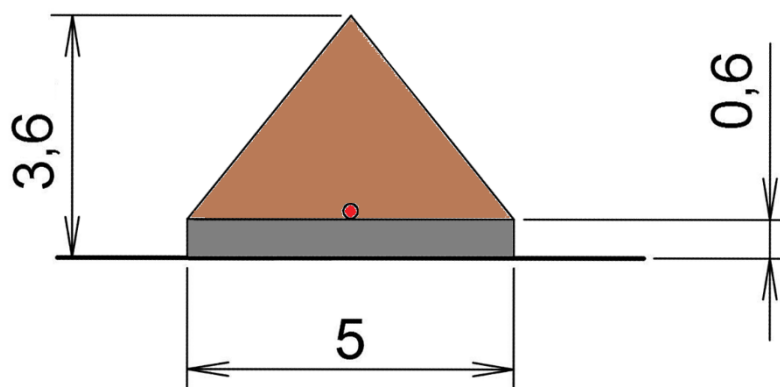
Způsob uchycení	Rovnice polynomičské regrese	R^2
Mamut Glue	$y = -3E-05x^3 + 0,0071x^2 - 0,1968x + 2,6463$	0,9938
Hřebíky a šrouby v tubě	$y = 1E-05x^3 - 0,0018x^2 + 0,1033x - 0,854$	0,9966

4.5.6 Nový způsob uchycení vláken

Další součástí měření bylo měření, kdy byl použit jiný způsob uchycení optického vlákna. Jelikož závislost Brillouinových frekvencí na teplotě u jednotlivých způsobu uchycení byla u všech vláken obdobná, bylo vybráno pouze jedno vlákno, u kterého byl vyzkoušen nový způsob uchycení. Pro měření bylo vybráno čtvrté vlákno. Důvodem tohoto měření, bylo testování vlivu velikosti vrstev lepidel na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí.

Postup přípravy uchycení optického vlákna zůstal stejný, jako předchozí způsob, jež je popsán na předešlých stranách. Byly pouze použity nové rozměry stěrek pro podkladové a krycí vrstvy. U obou vrstev byly použity stěrky s menšími rozměry oproti původnímu způsobu uchycení. Nová stěrka pro podkladové vrstvy byla opět realizována jako vypilovaný obdélníkový tvar do špachtle. Tentokrát však s výškou 0,6 mm a šířkou 5 mm (šířka tedy zůstala oproti původní stěrce stejná, výška byla zmenšena na polovinu). Pro novou stěrku na krycí vrstvy byl opět zakoupen přípravek trojúhelníkového tvaru. Jednalo se o trojúhelník o výšce přibližně 3 mm a šířce 5 mm. Šířka stěrky pro krycí vrstvy byla tedy stejná jako šířka stěrky pro podkladové vrstvy (u původního uchycení byla šířka stěrky pro krycí vrstvy o 4 mm větší než šířka stěrky pro podkladové vrstvy – viz obrázek 4.12; strana 38).

Na následujícím obrázku 4.37 je zobrazen náčrtek řezu uchyceného optického vlákna, kdy uchycení bylo provedeno novým, výše popsaným, způsobem. Šedou barvou je zobrazena podkladová vrstva, červenou barvou je zobrazeno optické vlákno a hnědou barvou je zobrazena krycí vrstva. Průměr optického vlákna byl 250 μm . Fotografie a okótované náčrty nových stěrek zobrazeny nebudou. Stěrka pro podkladové vrstvy je v podobná jako ta u původního způsobu uchycení (obrázek 4.6; strana 35), jen s tím rozdílem, že výška je 0,6 mm místo 1,2 mm. Stěrka pro krycí vrstvy také byla podobná stěrce původní (obrázek 4.10; strana 37), opět s menšími rozměry (viz předchozí odstavec).



Obrázek 4.37: Náčrtek řezu uchyceného vlákna novým způsobem

U nového způsobu uchycení byl opět spočítán objem lepidla použitý na jedné dráze (délka přibližně 290 mm). Objem lepidla na uchycení jedné dráhy novým způsobem u použitého čtvrtého vlákna (průměr 250 μm) je přibližně 3031 mm^3 . Pro připomenutí objem u původního způsobu uchycení vlákna o průměru 250 μm byl přibližně 6511 mm^3 . Objem lepidla na jedné dráze u původního způsobu uchycení byl tudíž přibližně 2,15x větší než objem lepidla u nového způsobu uchycení.

Zpracování naměřených výsledků je stejné jako u předchozích měření – opět jsou zobrazeny 2 grafy (závislosti Brillouinových frekvencí na teplotě) a 3 tabulky (první zobrazuje naměřené hodnoty a následující dvě zobrazují rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro oba grafy).

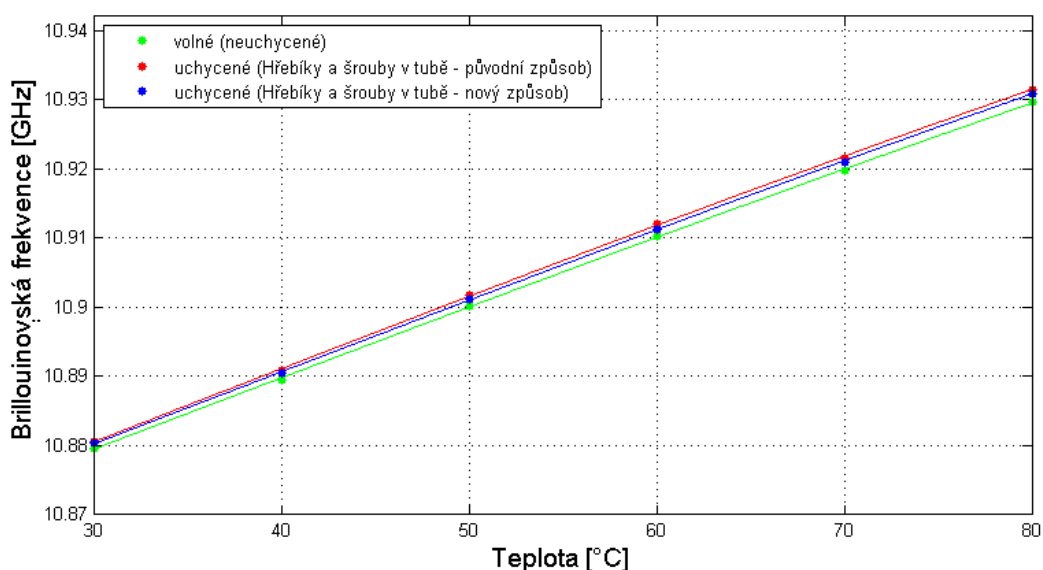
4.5.6.1 Uchycení pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě

V následující tabulce 4.17 jsou zobrazeny naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí všech tří měřených způsobů – vlákno neuchycené, vlákno uchycené původním způsobem, vlákno uchycené novým způsobem. K uchycení bylo využito lepidlo Hřebíky a šrouby v tubě.

Tabulka 4.17: Naměřené hodnoty Brillouinovských frekvencí

teplota [°C]	Brillouinovská frekvence [GHz]		
	neuchycené	Hřebíky a šrouby - původní	Hřebíky a šrouby - nový
30	10,87954	10,88059	10,88030
40	10,88958	10,89089	10,89044
50	10,90014	10,90169	10,90114
60	10,91020	10,91195	10,91131
70	10,91976	10,92161	10,92097
80	10,92954	10,93151	10,93088

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf (obrázek 4.38), ze kterého lze vidět, jakým způsobem se chovaly Brillouinovské frekvence s rostoucí teplotou u jednotlivého uchycení. Neuchycené vlákno mělo BF 10,87954 GHz při 30 °C. Hodnota BF poté s teplotou přibližně lineárně rostla až do hodnoty 10,92954 GHz při 80 °C. BF u vlákna uchyceného původním způsobem se chovaly obdobně jako BF vlákna neuchyceného - také rostly přibližně lineárně, ovšem s tím rozdílem, že BF byly posunuté na trochu vyšší hodnoty (rozdíl rostl s teplotou). Také sklon křivky popisující závislost BF na teplotě byl mírně strmější. Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 1,06 MHz a při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 1,97 MHz. BF u vlákna uchyceného novým způsobem se chovaly podobně jako u uchycení původního (opět byl sklon křivky popisující závislost BF na teplotě mnohem strmější vůči neuchycenému vláknu), ovšem oproti původnímu způsobu sklon nebyl až tak strmý a rozdíly BF vůči neuchycenému vláknu byly menší. Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 0,77 MHz, rozdíl se s teplotou postupně zvyšoval a při nejvyšší teplotě 80 °C byl 1,34 MHz.



Obrázek 4.38: Závislost Brillouinovské frekvence na teplotě

V následující tabulce 4.18 jsou zobrazeny rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximacím na obrázku 4.38.

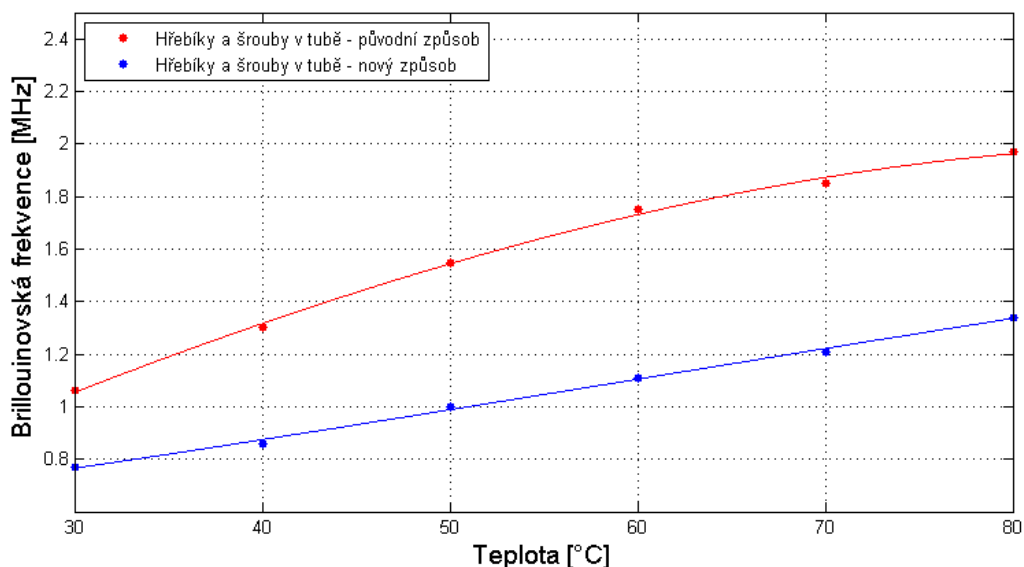
Tabulka 4.18: *Rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.38*

Způsob uchycení	Rovnice polynomické regrese	R^2
neuchycené	$y = -1\text{E-}08x^3 + 1\text{E-}06x^2 + 0,001x + 10,849$	0,9999
Hřebíky a šrouby – původní	$y = -1\text{E-}08x^3 + 1\text{E-}06x^2 + 0,001x + 10,849$	0,9999
Hřebíky a šrouby – nový	$y = -1\text{E-}08x^3 + 1\text{E-}06x^2 + 0,001x + 10,849$	0,9999

Z naměřených hodnot Brillouinových frekvencí byly také vypočítány teplotní koeficienty:

- U neuchyceného vlákna 1,00012 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Hřebíky a šrouby v tubě (původní) 1,01830 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Hřebíky a šrouby v tubě (nový) 1,01150 MHz / °C.

Na následujícím obrázku 4.39 je zobrazen graf, jež zobrazuje, jaký vliv měla použitá lepidla na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí. V tabulce 4.19 jsou následně zobrazeny rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximaci na obrázku 4.39.



Obrázek 4.39: *Vliv lepidel na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí*

Tabulka 4.19: *Rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.39*

Způsob uchycení	Rovnice polynomické regrese	R^2
Hřebíky a šrouby v tubě – původní	$y = -9\text{E-}07x^3 + 0,0002x^2 + 0,0033x + 0,5485$	0,9979
Hřebíky a šrouby v tubě – nový	$y = -1\text{E-}06x^3 - 4\text{E-}05x^2 + 0,0329x + 0,1311$	0,9986

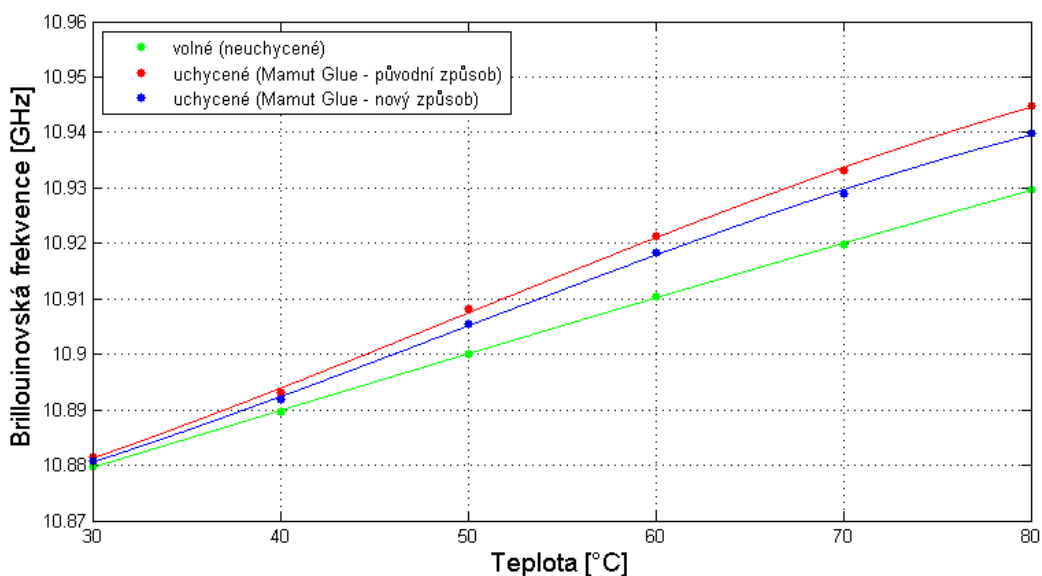
4.5.6.2 Uchycení pomocí lepidla Mamut Glue

V následující tabulce 4.20 jsou zobrazeny naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí všech tří měřených způsobů – vlákno neuchycené, vlákno uchycené původním způsobem, vlákno uchycené novým způsobem. K uchycení bylo využito lepidlo Mamut Glue.

Tabulka 4.20: Naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí

teplota [°C]	Brillouinová frekvence [GHz]		
	neuchycené	Mamut Glue - původní	Mamut Glue - nový
30	10,87964	10,88150	10,88072
40	10,88969	10,89306	10,89176
50	10,90013	10,90811	10,90543
60	10,91040	10,92124	10,91834
70	10,91974	10,93308	10,92901
80	10,92966	10,94475	10,93974

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf (obrázek 4.40), ze kterého lze vidět, jakým způsobem se chovaly Brillouinové frekvence s rostoucí teplotou u jednotlivého uchycení. Neuchycené vlákno mělo BF 10,87964 GHz při 30 °C. Hodnota BF poté s teplotou přibližně lineárně rostla až do hodnoty 10,92966 GHz při 80 °C. BF u vlákna uchyceného původním způsobem se chovaly oproti vláknu neuchycenému odlišně – byly posunuté na vyšší hodnoty (rozdíl rostl s teplotou). U tohoto způsobu uchycení byl sklon křivky, jež popisuje závislost BF na teplotě mnohem strmější (to odpovídá mnohem větší citlivosti na teplotě). Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 1,85 MHz a při nejvyšší teplotě 80 °C byl rozdíl 15,09 MHz. BF u vlákna uchyceného novým způsobem se chovaly podobně jako u uchycení původního (opět byl sklon křivky popisující závislost BF na teplotě mnohem strmější vůči neuchycenému vláknu), ovšem oproti původnímu způsobu sklon nebyl až tak strmý a rozdíly BF vůči neuchycenému vláknu byly menší. Při 30 °C byl rozdíl BF vůči neuchycenému vláknu 1,08 MHz, rozdíl se s teplotou postupně zvyšoval a při nejvyšší teplotě 80 °C byl 10,08 MHz.



Obrázek 4.40: Závislost Brillouinové frekvence na teplotě

V následující tabulce 4.21 jsou zobrazeny rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximacím na obrázku 4.40.

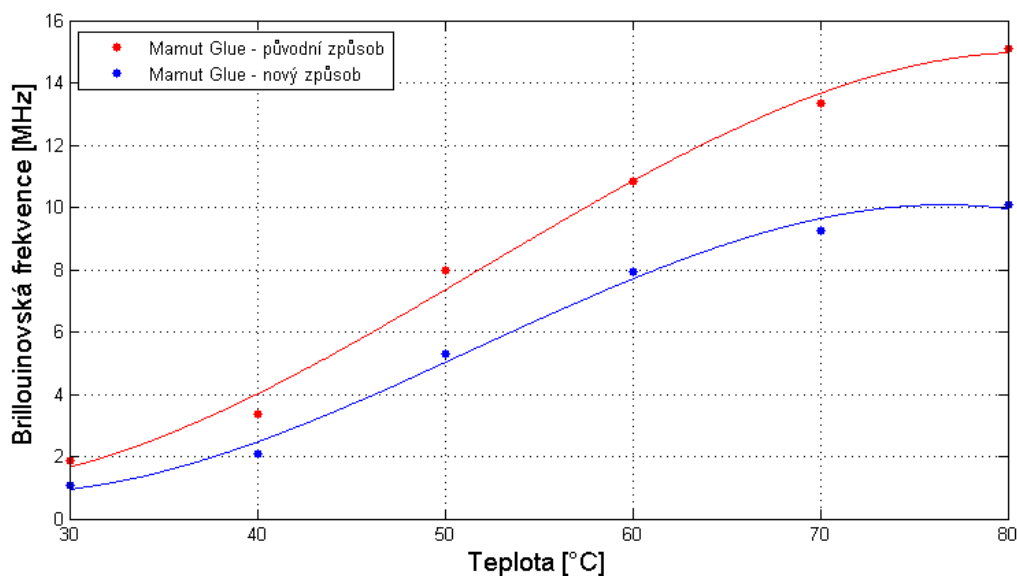
Tabulka 4.21: *Rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.40*

Způsob uchycení	Rovnice polynomické regrese	R^2
neuchycené	$y = -1\text{E-}08x^3 + 1\text{E-}06x^2 + 0,001x + 10,849$	0,9999
Mamut Glue – původní	$y = -2\text{E-}07x^3 + 2\text{E-}05x^2 + 0,0002x + 10,858$	0,9994
Mamut Glue – nový	$y = -2\text{E-}07x^3 + 2\text{E-}05x^2 + 9\text{E-}05x + 10,861$	0,9995

Z naměřených hodnot Brillouinových frekvencí byly také vypočítány teplotní koeficienty:

- U neuchyceného vlákna 1,00034 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Mamut Glue (původní) 1,26510 MHz / °C.
- U vlákna uchyceného pomocí Mamut Glue (nový) 1,18031 MHz / °C.

Na následujícím obrázku 4.41 je zobrazen graf, jež zobrazuje, jaký vliv měla použitá lepidla na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí. V tabulce 4.22 jsou následně zobrazeny rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 odpovídající aproximaci na obrázku 4.41.



Obrázek 4.41: *Vliv lepidel na naměřené hodnoty Brillouinových frekvencí*

Tabulka 4.22: *Rovnice polynomických regresí a hodnoty spolehlivosti R^2 pro obrázek 4.41*

Způsob uchycení	Rovnice polynomické regrese	R^2
Mamut Glue – původní	$y = -0,0001x^3 + 0,0229x^2 - 0,9024x + 11,423$	0,9934
Mamut Glue – nový	$y = -0,0001x^3 + 0,0216x^2 - 0,7641x + 8,8917$	0,9933

Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo změřit Brillouinovské frekvence různých optických vláken v závislosti na teplotě. Celkově bylo proměřeno pět různých telekomunikačních vláken (seznam je uveden v tabulce 4.1). Každé z pěti měřených vláken bylo měřeno trojím způsobem. Prvním způsobem měření bylo, kdy vlákna byla měřena neuchycená (tzn. holá). Další dva způsoby měření byly, kdy vlákna byla uchycená (fixována) pomocí dvou lepidel, a to Mamut Glue a Hřebíky a šrouby v tubě. Fixování bylo provedeno k plechům, které byly poté vloženy do teplotní komory, kde byla zvyšována teplota (rozmezí 30 °C až 80 °C, s krokem 10 °C). Způsob fixování byl u všech vláken totožný (více v podřazené podkapitole 4.2.1). Také bylo provedeno měření s menší vrstvou lepidla pro uchycení. Při tomto měření se využilo pouze jedno (čtvrté) z pěti měřených vláken. Naměřené výsledky, včetně jejich grafických znázornění a vypočítané teplotní koeficienty jsou zobrazeny v podkapitole 4.5. Dále jsou v práci tabulky, které slouží k porovnání naměřených hodnot Brillouinovských frekvencí a vypočítaných hodnot teplotních koeficientů u jednotlivých použitých optických vláken. Tyto tabulky jsou v příloze A.

Z naměřených hodnot (tabulky 4.2, 4.5, 4.8, 4.11 a 4.14) a jejich grafických znázornění (obrázky 4.27 až 4.36) lze vidět, jakým způsobem se chovaly Brillouinovské frekvence u jednotlivých způsobů měření a u jednotlivých použitých optických vláken. Hodnoty Brillouinovských frekvencí v závislosti na teplotě u neuchycených (holých) vláken rostly v závislosti na teplotě u všech vláken v podstatě stejně – křivky byly téměř lineární. V ideálním případě by pravděpodobně byla křivka úplně lineární, tyto menší odchylky byly pravděpodobně způsobené nepřesnostmi při měření. Rozdíl mezi jednotlivými vlákny spočíval v hodnotách Brillouinovských frekvencí (dále jen BF). Porovnání všech naměřených hodnot BF u všech pěti neuchycených vláken je zobrazeno v tabulce A.1, která je zobrazena v příloze této práce. Následně v tabulce A.4, která je rovněž v příloze, jsou poté porovnány koeficienty u všech pěti neuchycených vláken.

Hodnoty BF v závislosti na teplotě u vláken uchycených pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě se chovaly obdobně jako hodnoty BF vláken neuchycených. Hodnoty BF u všech vláken také rostly přibližně lineárně, ovšem s tím rozdílem, že byly posunuté na trochu vyšší hodnoty oproti vláknům neuchyceným. Rozdíl hodnot BF uchycených vláken lepidlem Hřebíky a šrouby v tubě vůči neuchyceným vláknům byl při 30 °C v rozmezí 0,77 až 0,95 MHz (u každého vlákna mírně jinak). Rozdíl se s rostoucí teplotou mírně zvyšoval a při nejvyšší teplotě 80 °C byl v rozmezí 1,52 MHz až 1,83 MHz (opět u každého vlákna jinak). Sklony křivek vláken uchycených pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě, které popisují závislosti BF na teplotě, byly tedy mírně strmější oproti sklonům křivek vláken neuchycených. Porovnání všech naměřených hodnot BF u všech pěti uchycených vláken pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě je zobrazeno v tabulce A.2, která je zobrazena v příloze této práce. Dále v tabulce A.4, která je rovněž v příloze, jsou poté porovnány koeficienty u všech pěti uchycených vláken lepidlem Hřebíky a šrouby v tubě.

Hodnoty BF v závislosti na teplotě u vláken uchycených pomocí lepidla Mamut Glue se chovaly odlišně jako hodnoty BF vláken neuchycených. Hodnoty BF u všech uchycených vláken lepidlem Mamut Glue byly posunuté na vyšší hodnoty vůči neuchyceným vláknům. Rozdíl hodnot BF uchycených vláken lepidlem Mamut Glue vůči neuchyceným vláknům byl při 30 °C v rozmezí 0,99 MHz až 2,26 MHz (u každého vlákna jinak). Rozdíl se s rostoucí teplotou výrazně zvyšoval a při

nejvyšší teplotě 80 °C byl v rozmezí 14,28 MHz až 21,64 MHz (znovu u každého vlákna jinak). Sklony křivek vláken uchycených pomocí lepidla Mamut Glue, které popisují závislosti BF na teplotě byly tedy mnohem strmější oproti sklonům křivek vláken neuchycených. To bylo pravděpodobně způsobeno tím, že s rostoucí teplotou u tohoto lepidla se lepidlo roztahovalo a vlivem teplotní roztahnosti působilo mnohem více na vlákno, než tomu bylo u lepidla předchozího. Roztahování lepidla mělo za následek, že na vlákno působilo i mechanické pnutí, které následně ovlivnilo naměřené hodnoty BF. Porovnání všech naměřených hodnot BF u všech pěti uchycených vláken pomocí lepidla Mamut Glue je zobrazeno v tabulce A.3, která je zobrazena v příloze této práce. Dále v tabulce A.4, která je rovněž v příloze, jsou poté porovnány koeficienty u všech pěti uchycených vláken lepidlem Mamut Glue.

Dalším měřením bylo, kdy vlákno bylo uchyceno novým způsobem (menší vrstvy podkladových a krycích vrstev). Tomuto měření odpovídají hodnoty v tabulkách 4.17 a 4.20 a grafy (obrázky 4.38 až 4.41). U uchyceného vlákna novým způsobem pomocí lepidla Hřebíky a šrouby v tubě nebyl sklon křivky popisující závislost Brillouinovské frekvence na teplotě tak strmý, jako tomu bylo u původního uchycení. Také hodnoty BF byly blíže k hodnotám BF neuchyceného vlákna. To lze vidět i na grafech (obrázky 4.38 a 4.39), kde rozdíl hodnot BF mezi vláknem uchyceným původním způsobem a vláknem uchyceným novým způsobem byl při 30 °C 0,29 MHz a při teplotě 80 °C byl rozdíl 0,63 MHz (rozdíl s teplotou mírně rostl). U uchyceného vlákna novým způsobem pomocí lepidla Mamut Glue opět nebyl sklon křivky popisující závislost Brillouinovské frekvence na teplotě tak strmý, jako tomu bylo u původního způsobu uchycení. Také hodnoty BF byly blíže k hodnotám BF neuchyceného vlákna. To lze vidět i na grafech (obrázek 4.40 a 4.41), kde rozdíl hodnot BF mezi vláknem uchyceným původním způsobem a vláknem uchyceným novým způsobem byl při 30 °C 0,77 MHz a při teplotě 80 °C byl rozdíl 5,01 MHz (rozdíl s teplotou rostl). Z těchto měření lze vyvodit, že kromě výběru fixačního materiálu také záleží na velikostech podkladových a krycích vrstev.

Co se týká návaznosti na tuto problematiku, ukazuje se, že znalost chování fixačních materiálů je potřebná a diplomová práce naznačila směr dalšího pokračování. Je potřeba vyzkoušet řadu nových způsobů měření a zohlednit mnoho dalších faktorů. Například v této práci byly využity pouze dva fixační materiály (byl testován i třetí materiál, ovšem u něj nebyla zatím nalezena vhodná technologie fixace) a naměřenými výsledky bylo dokázáno, že Brillouinovské frekvence se u použitých fixačních materiálů velmi liší a obě lepidla se chovaly s rostoucí teplotou odlišně. Z tohoto důvodu by proto bylo vhodné vyzkoušet i jiné typy lepidel.

Také by bylo vhodné změnit či alespoň vylepšit způsob uchycení optických vláken. Při této práci byly veškeré postupy uchycení realizovány ručně za pomoci stěrek, a tak je velmi pravděpodobné, že ruční způsob fixování, který zcela jistě není dokonalý, mohl mírně ovlivnit naměřené výsledky. Mohlo se stát, že vlákno nebylo na podkladových vrstvách umístěno přesně uprostřed, vlákno nebylo dostatečně nataženo, anebo při nanášení podkladových a krycích vrstev, kdy bylo lepidlo stáhnuto za pomoci stěrek podél vodící lišty, se mohlo stát, že stěrka nebyla pod úhlem 90 °C (vůči plechové podložce), a tak se mohly objevit místa s o trochu nižší či vyšší výškou podkladových resp. krycích vrstev. V ideálním případě by bylo nejlepší proces uchycení vláken zautomatizovat, ovšem to by byl složitý úkol a byl by vhodný spíše pro studenty jiných oborů. V této práci veškeré uchycení vláken bylo provedeno k pozinkovanému plechu o tloušťce 0,55 mm a jako další návrh se jeví vyzkoušet fixování k jiným typům materiálu – dřevo, beton, sklo, plast atd. Hlavní úkol je samozřejmě nalezení nejlepšího fixačního materiálu pro uchycení, a také nejlepší způsob uchycení. Každopádně, jak bylo zmíněno výše, je potřeba vyzkoušet spoustu nových způsobů měření.

Použitá literatura

- [1] DADO, Milan, I. TUREK, J. ŠTELINA, L. BITTERER, S. TUREK, E. GROLMUS a P. STIBOR. Kapitoly z optiky: pre technikov. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 1998, 348 s. ISBN 80-7100-390-5.
- [2] DOLEČEK, J. Moderní učebnice elektroniky – 3. díl: Optoelektronika: optoelektronické prvky a optická vlákna. 2005. ISBN 80-7300-184-5.
- [3] VOZŇÁK, M., J. SKAPA, L. MICHALEK, M. DVORSKÝ a R. ŠEBESTA. Úvod do komunikačních technologií: Vysokoškolská skripta. Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2421-5.
- [4] BOYD, Robert W. Nonlinear optics. 3rd ed. Boston: Academic Press, 2008, 613 s. ISBN 9780123694706.
- [5] AGRAWAL, Govind P. Nonlinear Fiber Optics. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1995, 592 s. ISBN 01-204-5142-5.
- [6] Nekomunikační aplikace optických vláken. *Optice.vsb.cz* [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: http://optice.vsb.cz/images/optice/predmety/NAOV/NAOV_skripta.pdf.
- [7] OPTOELEKTRONIKA: Skripta. *Optice.vsb.cz* [online]. [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/images/optice/predmety/OPTE/skripta%2027.1.2015%20BETA.pdf>
- [8] Rozptyl. *Fch.vut.cz* [online]. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.fch.vut.cz/~zmeskal/obring/presentace_2004/04_rozptyl.pdf
- [9] Optické komunikace 1 pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO. *Optice.vsb.cz* [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: http://optice.vsb.cz/images/optice/predmety/OKI/Optick%20komunikace%201%20-%20skripta_final-ISBN.pdf
- [10] Optické komunikace I: Cvičení č. 2.1. *Optice.vsb.cz* [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/images/optice/predmety/OKI/cvien%20.%202.1.pdf>
- [11] Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty. *Access.feld.cvut.cz* [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=uvod-do-distribuvanych-optovlaknovych-systemu-zalozenych-na-ramanove-jevu-pro-mereni-teploty&cislocclanku=2010030001>
- [12] Optická vlákna. *Goro.czweb.org* [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: <http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [13] 2. kapitola: Přenosová cesta optická. *Fei1.vsb.cz* [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO_02.pdf
- [14] P a r h e l i u m: Halo Observation Project 2007. *Ukazy.astro.cz* [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: <http://ukazy.astro.cz/gal/Parhelium200703.pdf>
- [15] Ramanovské zesilovače pro telekomunikace. *Access.feld.cvut.cz* [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2006032401>

- [16] NONLINEAR SCATTERING EFFECTS IN OPTICAL FIBERS. *Jpier.org* [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: <http://www.jpier.org/PIER/pier74/23.07051102.Singh.GS.pdf>
- [17] Optické sítě. *Data.cedupoint.cz* [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/161.pdf
- [18] Stimulated Brillouin scattering in optical fibers. *Osapublishing.org* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/aop/abstract.cfm?uri=aop-2-1-1>
- [19] Ming-jun Li: Managing nonlinearity in optical fiber for high-power lasers [online]. Dostupné z: <http://spie.org/x8658.xml>.
- [20] THE UNIVERSITY OF TEXAS AT DALLAS. STIMULATED RAMAN SCATTERING [online]. 2000 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.utdallas.edu/~cantrell/ee6328/srs.pdf>.
- [21] FTTX - pasivní infrastruktura. *Optomedia.cz* [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: <http://www.optomedia.cz/data/files/28tejklpasivniinfrastrukturapart1.pdf>
- [22] Optical fiber. *Rp-photonics.com* [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/img/fiber_orc.jpg
- [23] Princip fungování optického vlákna. *Hroch.spseol.cz* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <http://hroch.spseol.cz/~nozka/psk/038-opticka-vlakna-I/vlakno.png>
- [24] 10GBASE-LRM and EDC: Enabling 10GB Deployment in the Enterprise. *Cisco.com* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/transceiver-modules/prod_white_paper0900aecd806b8bcb.html
- [25] Využití distribuovaných optovláknových systémů při detekci průvanů v jeskynních systémech. *Elektrorevue.cz* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/vyuziti-distibuovanych-optovlaknovych-systemu-pri-detekci-pruvanu-v-jeskynnich-systemech/>
- [26] Měření optických vláken. *Data.cedupoint.cz* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/160.pdf
- [27] Aplikace DTS systémů v oblasti výzkumu vlastností betonových směsí. *Optice.vsb.cz* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/index.php/aplikace-dts-beton>
- [28] DITEST STA-R. *Optice.vsb.cz* [online]. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/index.php/ditest-sta-r>
- [29] Optické propojovací kabely s konektory Diamond: Patchcordy a pigtaily s optickými konektory Diamond. *Sqs-fiberoptics.com* [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.sqs-fiberoptics.com/?fiberoptics=13&langue=cz&products=diamond-optical-connectors>

Seznam příloh

Příloha A:	Porovnání hodnot Brillouinovských frekvencí a teplotních koeficientů	I
------------	----------------------------------------------------------------------------	---

Příloha A: *Porovnání hodnot Brillouinovských frekvencí a teplotních koeficientů*

Tabulka A.1: *Porovnání naměřených hodnot BF u neuchycených vláken*

teplota [°C]	Brillouinovská frekvence [GHz]				
	vlákno 1	vlákno 2	vlákno 3	vlákno 4	vlákno 5
30	10,84876	10,84264	10,85114	10,87952	10,63245
40	10,85895	10,85285	10,86117	10,88956	10,64191
50	10,86956	10,86272	10,87115	10,90013	10,65363
60	10,87918	10,87488	10,88117	10,91019	10,66281
70	10,88908	10,88485	10,89175	10,91974	10,67444
80	10,90023	10,89700	10,90145	10,92953	10,68535

Tabulka A.2: *Porovnání naměřených hodnot BF u vláken uchycených (Hřebíky a šrouby v tubě)*

teplota [°C]	Brillouinovská frekvence [GHz]				
	vlákno 1	vlákno 2	vlákno 3	vlákno 4	vlákno 5
30	10,84958	10,84339	10,85190	10,88039	10,63340
40	10,85992	10,85376	10,86216	10,89069	10,64303
50	10,87073	10,86380	10,87235	10,90149	10,65492
60	10,88038	10,87606	10,88253	10,91175	10,66419
70	10,89047	10,88617	10,89321	10,92141	10,67596
80	10,90185	10,89852	10,90307	10,93131	10,68718

Tabulka A.3: *Porovnání naměřených hodnot BF u vláken uchycených (Mamut Glue)*

teplota [°C]	Brillouinovská frekvence [GHz]				
	vlákno 1	vlákno 2	vlákno 3	vlákno 4	vlákno 5
30	10,84975	10,84390	10,85378	10,88150	10,63447
40	10,86042	10,85612	10,86986	10,89306	10,64642
50	10,87528	10,86912	10,88256	10,90811	10,65884
60	10,88804	10,88530	10,89443	10,92124	10,67233
70	10,90101	10,90040	10,90903	10,93308	10,68595
80	10,91450	10,91724	10,92308	10,94475	10,69986

Tabulka A.4: *Porovnání vypočítaných teplotních koeficientů*

vlákno [-]	Teplotní koeficient [MHz / °C]		
	neuchycené	Mamut Glue	Hřebíky a šrouby v tubě
Vlákno 1	1,02926	1,29508	1,04526
Vlákno 2	1,08725	1,46678	1,10265
Vlákno 3	1,00620	1,38619	1,02340
Vlákno 4	1,00011	1,26510	1,01830
Vlákno 5	1,05797	1,30786	1,07557